

# РОЛЬ ПРИМЕСНЫХ ИОНОВ В ФОРМИРОВАНИИ НЕЛИНЕЙНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА НЕМАТИЧЕСКОЙ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ

**Ф.В. Подгорнов<sup>1</sup>, А.М. Гавриляк<sup>1</sup>, М.В. Гавриляк<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

E-mail: gavriilyak.maksim@yandex.ru

**Аннотация.** Экспериментально исследован нелинейный диэлектрический отклик нематического жидкого кристалла (НЖК). Показано наличие нечетных гармоник в диэлектрическом отклике в низкочастотной области спектра (от 0,5 мГц до 600 Гц). Выявлены два релаксационных эффекта, вызванных переносом примесных ионов – поляризация пространственного заряда и образование двойных электрических слоев.

*Ключевые слова:* нематические жидкие кристаллы; примесные ионы; поляризация пространственного заряда; двойной электрический слой; нелинейная диэлектрическая спектроскопия.

## Введение

Классическими областями применения жидких кристаллов (ЖК) являются оптические пространственные модуляторы света [1, 2], дисплеи [3, 4], дифракционные элементы [5, 6] и другие электрооптические устройства [7, 8]. Однако в последнее время возникают новые области применения жидких кристаллов, такие как высокочувствительные гибкие датчики температуры [9] и давления [10], биосенсоры [11], квантовая криптография [12] и др. [13].

Несмотря на высокие требования к чистоте жидкокристаллических материалов, ионные примеси могут возникать в объеме ЖК как в процессе их синтеза [14], так и в процессе сборки [15] и работы устройств [16]. Таким образом, нелинейное поведение ионных примесей в жидкокристаллических устройствах является актуальной темой исследования, поскольку ионные примеси, попадающие в объем ЖК, негативно влияют на работу устройств, вызывая залипание и мерцание изображения в дисплеях [17, 18], а также снижение чувствительности и ложные срабатывания в жидкокристаллических сенсорах [19]. Ионные примеси под действием внешнего электрического поля приводят к изменению электрооптического отклика в модуляторах света [20] в результате изменения диэлектрических свойств ЖК [21, 22] и экранирования внешнего электрического поля [23, 24]. В серии работ [25, 26] была предложена модель динамического делителя напряжения, учитывающая перераспределение электрического поля внутри жидкокристаллической ячейки между ЖК и ориентирующим слоем. Согласно данной модели, форма и амплитуда напряжения, падающего на слое жидкого кристалла, зависят от электрических сопротивлений компонентов ЖК-ячейки, таких как ориентирующие слои, слой ЖК и двойной электрический слой [27].

Среди различных методов исследования ионных процессов в жидких кристаллах (напр. электрооптический [28, 29], циклическая вольтамперометрия [30] и др. [31]) можно выделить импедансную спектроскопию. Данный метод позволяет идентифицировать основные ионные процессы, протекающие преимущественно при низких частотах [32, 33]. В статье [34] рассмотрен метод определения подвижности ионной примеси в ЖК-ячейке импедансным методом. Предложено теоретическое описание поведения комплексного диэлектрического спектра ЖК, полученное с помощью решения уравнения диффузии [35, 36]. В предположении отсутствия переноса заряда и адсорбции на электродах продемонстрировано влияние диффузионной части двойного электрического слоя на спектры комплексного импеданса в низкочастотной области [37, 38]. Расширенная модель прыжковой ионной проводимости диэлектрических пленок позволяет получить уравнения частотной дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости и электрической проводимости для жидкокристаллической ячейки с учетом влияния ориентирующих слоев [39].

Вышеописанные исследования проводились в предположении линейности диэлектрического отклика системы при малых амплитудах осциллирующего напряжения (меньше теплового напряжения  $U < kT/ze$ , где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $z$  – валентность ионов,  $e$  – элементарный заряд). Однако в существующих устройствах к жидкому кристаллу при-

кладывается управляющий электрический сигнал, амплитуда которого превышает величину теплового напряжения, что должно приводить к нелинейности диэлектрического отклика [40–43].

Целью данной работы является идентификация физических процессов, ответственных за возникновение низкочастотного нелинейного диэлектрического отклика нематических жидких кристаллов.

### Методика эксперимента

В данной работе исследовалась нематическая жидкокристаллическая смесь E7, являющаяся термотропным нематиком с температурой фазового перехода в изотропную жидкость  $T \approx 330$  К и положительной диэлектрической анизотропией ( $\Delta\varepsilon \approx 12$ ). Для измерения нелинейных диэлектрических спектров изготовлена жидкокристаллическая ячейка с планарной ориентацией. Такая ячейка представляет собой две параллельные стеклянные пластины, покрытые проводящим слоем из оксида индия-олова, с нанесенным на него слоем полиимида нейлон 6. Для задания планарной ориентации полимерный слой натирался мягкой ворсистой тканью. Толщина ячейки измерялась спектральным методом и составила  $d_{cell} = 14$  мкм.

Диэлектрические измерения проведены с помощью импедансного спектрометра Novocontrol Beta System в частотном диапазоне от 0,5 мГц до 1 МГц. Амплитуда осциллирующим напряжением выбиралась  $U_{osc} = 5$  мВ и 3 В для линейного и нелинейного режимов соответственно. Температура ЖК-ячеек контролировалась с помощью термостолка Linkam HFS600E-PB4. Для проведения нелинейных диэлектрических измерений выбраны следующие температуры:  $T = 298$  К и  $T = 353$  К для нематической и изотропной фазы соответственно.

### Результаты и обсуждение

Нелинейная диэлектрическая спектроскопия (НДС) представляет собой расширенную версию классической диэлектрической спектроскопии. В рамках НДС на образец подаётся переменное электрическое напряжение с большей амплитудой по сравнению с тепловым напряжением. В таком случае регистрируемый токовый отклик перестаёт быть строго синусоидальным и включает в себя вклад высших гармоник. Высшие гармоники тока  $I_n(\omega)$  рассчитываются с помощью комплексного преобразования Фурье из электрического тока  $i(t)$ :

$$I_n(\omega) = \frac{2}{nT} \int_0^{n\tau} i(t) e^{jn\omega t} dt, \quad (1)$$

где  $n$  – номер гармоники,  $j$  – мнимая единица,  $\omega$  – циклическая частота осциллирующего напряжения,  $\tau$  – время периода.

Гармонические составляющие нелинейного комплексного спектра импеданса определяются по аналогии с классической импедансной спектроскопией:

$$Z_n(\omega) = \frac{U(\omega)}{I_n(\omega)}, \quad (2)$$

где  $U(\omega)$  – комплексная амплитуда приложенного осциллирующего электрического напряжения.

Используя параметры ЖК-ячейки и измеренный спектр импеданса, можно рассчитать комплексные спектры нелинейной диэлектрической проницаемости высших гармоник  $\varepsilon_n(\omega) = \varepsilon'_n(\omega) - j\varepsilon''_n(\omega)$ :

$$\varepsilon'_n(\omega) = \frac{Z_n''(\omega) d_{cell}}{\omega \varepsilon_0 S (Z_n'(\omega)^2 + Z_n''(\omega)^2)}, \quad (3)$$

$$\varepsilon''_n(\omega) = \frac{Z_n'(\omega) d_{cell}}{\omega \varepsilon_0 S (Z_n'(\omega)^2 + Z_n''(\omega)^2)}, \quad (4)$$

где  $Z_n'(\omega)$  и  $Z_n''(\omega)$  –  $n$ -е гармоники действительной и мнимой части импеданса,  $S$  – площадь перекрытия электродов ЖК-ячейки,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная.

Таким образом, с помощью нелинейной комплексной диэлектрической спектроскопии можно исследовать нелинейную зависимость диэлектрической релаксации. Спектры основной гар-

мониторинга действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости нематического жидкого кристалла в планарной ячейке при температурах  $T = 298$  К и  $T = 353$  К представлены на рис. 1. На данных графиках видно, что в диэлектрических спектрах присутствуют три релаксационных процесса. Первый процесс в области высоких частот от 100 Гц и выше связан с вращением молекул жидкого кристалла. В экспериментальных данных наблюдается плоский участок, зависящий от приложенного напряжения и температуры. Если приложенное напряжение меньше, чем напряжение Фредерикса ( $U < U_{th}$ ), наблюдаемое плато соответствует диэлектрической проницаемости планарной ориентации ЖК, которая составляет  $\epsilon'_\perp = 5,3$ . В противоположном случае, когда  $U > U_{th}$ , происходит переориентация директора НЖК во внешнем электрическом поле, а диэлектрическая проницаемость будет равна усредненному значению  $\epsilon'_\perp$  и  $\epsilon'_\parallel$  составляющих проницаемости НЖК. Величина действительной части проницаемости при приложенном переменном электрическом напряжении с амплитудой  $U = 3$  В на частоте  $\nu = 10$  кГц составила  $\epsilon' = 14,3$ .

В изотропной фазе при  $T = 353$  К ввиду разориентированности молекул жидкого кристалла диэлектрическая проницаемость остаётся постоянной и не зависит от напряжения. Диэлектрическая проницаемость ЖК в изотропной фазе равна  $\epsilon'_{iso} = 9,4$  на частоте  $\nu = 10$  кГц.

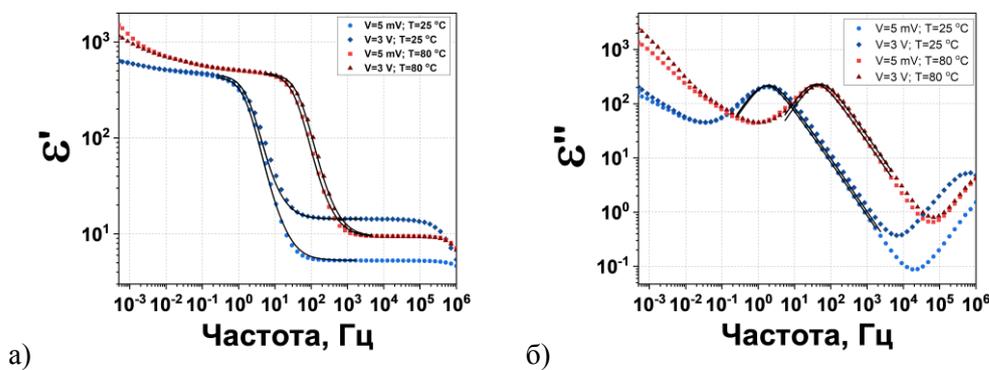


Рис. 1 а) действительная и б) мнимая части спектра диэлектрической проницаемости в зависимости от напряжения и температуры

Второй релаксационный процесс в области низких частот связан с поляризацией пространственного заряда, т. е. с движением противоположно заряженных примесных ионов в объеме ЖК и накоплением их на границе с электродом. Этот процесс проявляется в резком возрастании диэлектрической проницаемости на частотах  $\nu < 100$  Гц, пока не достигнет максимума и не выйдет на плато в виду разделения заряда и образования дипольного момента, ограниченного толщиной зазора ЖК-ячейки. С повышением температуры релаксационный процесс смещается в область более высоких частот из-за уменьшения кинематической вязкости НЖК. В этом случае появляется третий низкочастотный релаксационный процесс, предположительно связанный с релаксацией двойного электрического слоя, образующегося в ЖК-ячейке. Однако сложность анализа данного эффекта связана с большим временем релаксации и ограничением работы измерительного прибора.

Частотная зависимость действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости, описывающая процесс поляризации пространственного заряда, выражается как [44]

$$\epsilon' = - \left( \frac{ne^2 D}{\omega \epsilon_0 k T A} \right) \left( \frac{1 + 2 \exp(A) \sin(A) - \exp(2A)}{1 + 2 \exp(A) \cos(A) + \exp(2A)} \right), \quad (5)$$

$$\epsilon'' = \left( \frac{ne^2 D}{\omega \epsilon_0 k T} \right) \left( 1 + \frac{1 - 2 \exp(A) \sin(A) - \exp(2A)}{A(1 + 2 \exp(A) \cos(A) + \exp(2A))} \right), \quad (6)$$

где  $n$  – концентрация примесных ионов,  $D$  – коэффициент диффузии,  $A = d_{cell} \sqrt{\omega/2D}$ .

Результаты аппроксимации уравнениями (5), (6) представлены в виде сплошных линий (см. рис. 1). При низких частотах  $\nu < 10$  мГц наблюдается отклонение аппроксимационных кривых от

экспериментальных данных. Данное отклонение может быть связано с включением низкочастотного релаксационного процесса, а именно релаксации двойных электрических слоёв.

В таблице представлены концентрация и коэффициенты диффузии примесных ионов, полученные по результатам аппроксимации. Анализ аппроксимированных параметров показывает, что с повышением температуры происходит увеличение концентрации примесных ионов, в то время как при увеличении напряжения их концентрация остаётся неизменной. Также наблюдается зависимость подвижности ионов от напряжения и температуры. При повышении напряжения в нематической фазе ( $T = 298$  К) коэффициент диффузии увеличивается ввиду переориентации молекул жидкого кристалла, что связано с явлением анизотропии подвижности ионов в ЖК. С ростом температуры коэффициент диффузии увеличивается на порядок. Это связано с увеличением подвижности ионов из-за уменьшения кинематической вязкости жидкого кристалла в изотропной фазе ( $T = 353$  К). Увеличение подвижности ионов в изотропной фазе при повышении напряжения может быть связано с нелинейным электрофоретическим движением примесных ионов в ЖК-ячейке [45].

Параметры пространственной поляризации

№	$T$ , К	$U$ , В	$n$ , $M^{-3}$	$D$ , $M^2/c$
1	298	0,005	$1,14 \cdot 10^{20}$	$1,10 \cdot 10^{-11}$
2	298	3	$1,18 \cdot 10^{20}$	$1,26 \cdot 10^{-11}$
3	353	0,005	$1,45 \cdot 10^{20}$	$2,52 \cdot 10^{-10}$
4	353	3	$1,46 \cdot 10^{20}$	$3,27 \cdot 10^{-10}$

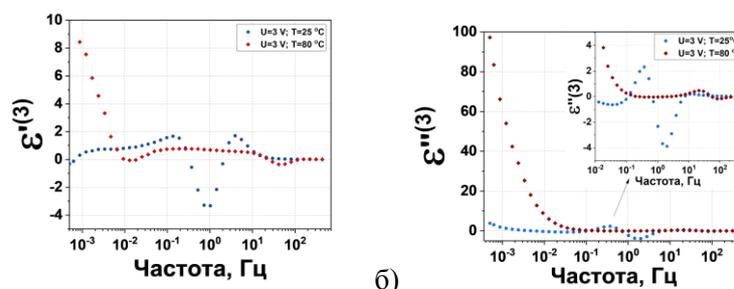


Рис. 2. а) действительная и б) мнимая части диэлектрической проницаемости третьей гармоники НЖК при температурах 298 К и 353 К

Экспериментальное исследование планарной нематической ЖК-ячейки в частотном диапазоне от 0,5 мГц до 600 Гц показало наличие третьей гармоники в спектрах комплексной диэлектрической проницаемости (рис. 2). Как видно из графиков, кривые действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости на третьей гармонике имеют несколько точек перегиба и могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Как было показано в ранних исследованиях [46], процесс поляризации пространственного заряда примесных ионов является нелинейным ввиду насыщения дипольного момента и характеризуется наличием третьей гармоники диэлектрического отклика, что также подтверждается результатами эксперимента в частотном диапазоне от 0,1 до 600 Гц, что соответствует росту диэлектрической проницаемости на основной гармонике. Стоит отметить, что нелинейность данного процесса в нематической фазе является более выраженной по сравнению с изотропной фазой. Однако для второго более низкочастотного эффекта ( $\nu < 0,1$  Гц) амплитуда третьей гармоники комплексной диэлектрической проницаемости на порядок больше в изотропной фазе. Это подтверждает тот факт, что нелинейность, возможно связанная с релаксацией двойного электрического слоя, преобладает в сравнении с релаксацией поляризации пространственного заряда.

### Выводы

В данной статье исследованы механизмы возникновения нелинейности диэлектрического отклика в планарной ячейке, заполненной нематической жидкокристаллической смесью E7.

Анализ полученных данных выявил наличие двух релаксационных эффектов, проявляющих нелинейное поведение и возникновение третьей гармоники комплексной диэлектрической проницаемости в низкочастотной области спектра. Первый эффект связан с поляризацией пространственного заряда, возникающей из-за пространственного разделения примесных ионов в объеме жидкого кристалла во внешнем электрическом поле. Данный эффект проявляется в резком воз-

растании действительной части диэлектрической проницаемости при понижении частоты осциллирующего электрического напряжения от 100 до 0,1 Гц в нематической фазе и от 5 кГц до 5 Гц в изотропной фазе. Такой сдвиг в характерных частотах обусловлен уменьшением кинематической вязкости НЖК при возрастании температуры. Наличие второго эффекта, проявляющегося в дальнейшем повышении действительной части диэлектрической проницаемости, может быть объяснено образованием двойных электрических слоёв в ЖК-ячейке.

#### Литература

1. Yang, Y. A Review of Liquid Crystal Spatial Light Modulators: Devices and Applications / Y. Yang, A. Forbes, L. Cao // *Opto-Electronic Science*. – 2023. – Vol. 2, Iss. 8. – P. 230026.
2. High Fidelity Laser Beam Shaping using Liquid Crystal on Silicon Spatial Light Modulators as Diffractive Neural Networks / P. Buske, O. Hofmann, A. Bonnhoff *et al.* // *Optics Express*. – 2024. – Vol. 32, Iss. 5. – P. 7064.
3. Advanced Liquid Crystal Devices for Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Principles and Applications / K. Yin, En. L. Hsiang, Ju. Zou *et al.* // *Light: Science and Applications*. – 2022. – Vol. 11, Iss. 1. – P. 1–22.
4. Mini-LED Backlight Technology Progress for Liquid Crystal Display / Z. Gao, H. Ning, R. Yao *et al.* // *Crystals*. – 2022. – Vol. 12, Iss. 3. – P. 313.
5. On Liquid Crystal Diffractive Optical Elements Utilizing Inhomogeneous Alignment / S. Valyukh, H. Arwin, V. Chigrinov, H. S. Kwok // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, Iss. 14. – P. 15209–15221.
6. Дифракционные решетки с поверхностным микрорельефом из оптически анизотропного материала / В.В. Беляев, А.С. Соломатин, S. Кумар и др. // *Оптический журнал*. – 2021. – Т. 88, № 1. – С. 44–52.
7. Advanced Liquid Crystal-Based Switchable Optical Devices for Light Protection Applications: Principles and Strategies / R. Zhang, Zh. Zhang, J. Han *et al.* // *Light: Science and Applications*. – 2023. – Vol. 12, Iss. 1. – P. 11.
8. Photonic Devices with Multi-Domain Liquid Crystal Structures / A. Kudreyko, V. Chigrinov, K. Neyts *et al.* // *Crystals*. – 2024. – Vol. 14, Iss. 6. – P. 512.
9. Highly Sensitive and Transparent Flexible Temperature Sensor based on Nematic Liquid Crystals / K. Wu, J. Sun, L. Gao *et al.* // *Liquid Crystals*. – 2022. – Vol. 49, Iss. 3. – P. 372–379.
10. A Flexible Liquid Crystal Polymer MEMS Pressure Sensor Array for Fish-Like Underwater Sensing / A.G.P. Kottapalli, M. Asadnia, J. M. Miao *et al.* // *Smart Materials and Structures*. – 2012. – Vol. 21, Iss. 11. – P. 115030
11. Luan, Ch. Application and Technique of Liquid Crystal-Based Biosensors / Ch. Luan, H. Luan, D. Luo // *Micromachines*. – 2020. – Vol. 11, Iss. 2. – P. 176.
12. Polarization-Correction Device with Liquid Crystals for Quantum-Key-Distribution Satellite Systems / A. Jimenez-Girela, D. Merino-Pérez, A. Campos-Jara *et al.* // *Physical Review Applied*. – 2025. – Vol. 23, Iss. 6. – P. 064070.
13. Optical Quantum Computing using Liquid Crystal Devices/ H. Okada, T. Watanabe, S. Yokotsuka, A. Terazawa // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2024. – Vol. 768, Iss. 7. – P. 59–90.
14. Ionic Liquid Crystals: Synthesis, Structure and Applications to I<sub>2</sub>-free Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells / W.S. Chi, H. Jeon, S.J. Kim *et al.* // *Macromolecular Research*. – 2013. – Vol. 21. – P. 315–320.
15. Garbovskiy, Y. Nano-Objects and Ions in Liquid Crystals: Ion Trapping Effect and Related Phenomena / Y. Garbovskiy, I. Glushchenko // *Crystals*. – 2015. – Vol. 5, Iss. 4. – P. 501–533.
16. Garbovskiy, Y. Time-Dependent Electrical Properties of Liquid Crystal Cells: Unravelling the Origin of Ion Generation / Y. Garbovskiy // *Liquid Crystals*. – 2018. – Vol. 45, Iss. 10. – P. 1540–1548.
17. Flicker-Free Fringe-Field Switching Liquid Crystal Display Operable at Extremely Low Frequencies for Power Saving / J. C. Choi, J. W. Lee, D. J. Lee *et al.* // *Advanced Engineering Materials*. – 2021. – Vol. 23, Iss. 9. – P. 2100174.
18. Image Sticking in Liquid Crystal Displays with Lateral Electric Fields / D. Xu, F. Peng, H. Chen *et al.* // *Journal of Applied Physics*. – 2014. – Vol. 116, Iss. 19. – P. 193102.

19. Garbovskiy Y. Conventional and Unconventional Ionic Phenomena in Tunable Soft Materials Made of Liquid Crystals and Nanoparticles / Y. Garbovskiy // *Nano Express*. – 2021. – Vol. 2, Iss. 1. – P. 012004.
20. Palomares, L.O. Optical Response of a Nematic Sample Submitted to a Periodic External Electric Field: Role of the Ionic Impurities / L.O. Palomares, J.A. Reyes, G. Barbero // *Physics Letters A*. – 2004. – Vol. 333, Iss. 1-2. – P. 157–163.
21. Dielectric Properties of Liquid Crystalline Composites Doped with Nano-Dimensional Fragments of Shungite Carbon / D.N. Chausov, A.D. Kurilov, A.V. Kazak *et al.* // *Liquid Crystals*. – 2019. – Vol. 46, Iss. 9. – P. 1345–1352.
22. Shcherbinin, D.P. Ionic Impurities in Nematic Liquid Crystal Doped with Quantum Dots CdSe/ZnS / D.P. Shcherbinin, E.A. Konshina // *Liquid Crystals*. – 2017. – Vol. 44, Iss. 4. – P. 648–655.
23. Naemura, S. Liquid-Crystal-Material Technologies for Advanced Display Applications / S. Naemura // *Journal of the Society for Information Display*. – 2000. – Vol. 8, Iss. 1. – P. 5–9.
24. Вклад примесных ионов в пространственно-временное распределение локального электрического поля в нематической жидкокристаллической ячейке / А. М. Гавриляк, М. В. Гавриляк, В.А. Боронин, Ф.В. Подгорнов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математика. Механика. Физика»*. – 2025. – Т. 17, № 2. – С. 69–81
25. Modeling Electrooptical Effects in Ferroelectric Liquid Crystals. 1. Basic Equations and Experimental Tests / S.P. Palto, L.M. Blinov, F.V. Podgornov, W. Haase // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2004. – Vol. 410.
26. Mechanism of Electrooptic Switching Time Enhancement in Ferroelectric Liquid Crystal/Gold Nanoparticles Dispersion / F.V. Podgornov, W. Haase, M. Gavrilyak *et al.* // *Liquid Crystals*. – 2018. – Vol. 45, Iss. 11. – P. 1594–1602.
27. Direct Current Electric Conductivity of Ferroelectric Liquid Crystals–Gold Nanoparticles Dispersion Measured with Capacitive Current Technique / A.R. Karaawi, M.V. Gavrilyak, V.A. Boronin *et al.* // *Liquid Crystals*. – 2020. – Vol. 47, Iss. 10. – P. 1507–1515.
28. Molecular Reorientation Dynamics due to Direct Current Voltage-Induced Ion Redistribution in Undoped Nematic Planar Cell / P. Pagliusi, B. Zappone, G. Cipparrone, G. Barbero // *Journal of applied physics*. – 2004. – Vol. 96, Iss. 1. – P. 218–223.
29. Konshina, E.A. Study of Dynamic Light Scattering in Nematic Liquid Crystal and Its Optical, Electrical and Switching Characteristics / E.A. Konshina, D.P. Shcherbinin // *Liquid Crystals*. – 2018. – Vol. 45, Iss. 2. – P. 292–302.
30. Optical and Electrical Characterization of a Gold Nanoparticle Dispersion in a Chiral Liquid Crystal Matrix / M. Infusino, A. De Luca, F. Ciuchi *et al.* // *Journal of Materials Science*. – 2014. – Vol. 49, Iss. 4. – P. 1805–1811.
31. Transient and Steady Electric Currents Through a Liquid Crystal Cell / P.P. Korniychuk, A.M. Gabovich, A.I. Voitenko *et al.* // *Liquid Crystals*. – 2010. – Vol. 37, Iss. 9. – P. 1171–1181.
32. Рыбаков, Д.О. Двойные электрические слои и их влияние на низкочастотную диэлектрическую проницаемость 4-Н-Пентил-4'-Цианофенила (5СВ) / Д.О. Рыбаков, В.В. Беляев // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 40–47.
33. Беляев, Б.А. Влияние ионных примесей на импедансные спектры жидких кристаллов / Б.А. Беляев, Н.А. Дрокин, А.Н. Масленников // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. – 2012. – № 4(42). – С. 39–46.
34. Belyaev, B.A. Impedance Spectroscopy Investigation of Electrophysical Characteristics of the Electrode-Liquid Crystal Interface / B.A. Belyaev, N.A. Drokin // *Physics of the Solid State*. – 2015. – Vol. 57, Iss. 1. – P. 181–187.
35. Sawada, A. Dielectric Process of Space-Charge Polarization for an Electrolytic Cell with Blocking Electrodes / A. Sawada // *Journal of Chemical Physics*. – 2008. – Vol. 129, Iss. 6. – P. 064701.
36. Sawada, A. Electrode Process of Mobile Ions in Generating Space-Charge Polarization / A. Sawada, T. Manaka // *Physical Review E*. – 2024. – Vol. 109, Iss. 3. – P. 034802.
37. Sawada, A. Modeling of Electrode Polarization for Electrolytic Cells with a Limited Ionic Adsorption / A. Sawada // *Physical Review E – Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. – 2013. – Vol. 88, Iss. 3. – P. 032406.

38. Alexe-Ionescu, A.L. Complex Dielectric Constant of a Nematic Liquid Crystal Containing Two Types of Ions: Limit of Validity of the Superposition Principle / A.L. Alexe-Ionescu, G. Barbero, I. Lelidis // *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2009. – Vol. 113, Iss. 44. – P. 14747–14753.
39. Iwamoto, M. The Dielectric Dispersion of Insulating Films With Long-Range Movements of Charge Carriers / M. Iwamoto // *Journal of applied physics*. – 1995. – Vol. 77, Iss. 10. – P. 5314–5321.
40. Non Linear Dielectric Spectroscopy: A Method to Determine Physical Parameters of Ferroelectric Liquid Crystals / J.M. Leblond, R. Douali, C. Legrand, R. Dabrowski // *The European Physical Journal. Applied Physics*. – 2006. – Vol. 36, Iss. 2. – P. 157–163.
41. Nonlinear Dielectric Spectroscopy of МНРОВС / K. Tanaka, M. Ichikawa, Y Kimura // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. – 2007. – Vol. 477, Iss. 1. – P. 195–204.
42. Derfel, G. Numerical Study of Ionic Contribution to Susceptibility and Impedance of Dielectric Liquid Layer / G. Derfel, G. Barbero // *Journal of Molecular Liquids*. – 2009. – Vol. 150, Iss. 1-3. – P. 43–50.
43. Richert, R. Nonlinear Dielectric Effects in Liquids: A Guided Tour / R. Richert // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2017. – Vol. 29, Iss. 36. – P. 363001.
44. Sawada A. Novel Characterization Method of Ions in Liquid Crystal Materials by Complex Dielectric Constant Measurements / A. Sawada, K. Tarumi, S. Naemura // *Japanese journal of applied physics*. – 1999. – Vol. 38, Iss. 3R. – P. 1423.
45. Podgornov, F.V. Dynamics of Nonlinear Electrophoretic Motion of Dielectric Microparticles in Nematic Liquid Crystal / F.V. Podgornov, A.V. Ryzhkova, W. Haase // *Journal of Molecular Liquids*. – 2018. – Vol. 267. – P. 345–352.
46. Вклад поляризации пространственного заряда в нелинейный спектр диэлектрической проницаемости нематического жидкого кристалла: компьютерное моделирование / М.В. Гавриляк, А.М. Гавриляк, В.А. Боронин, Ф.В. Подгорнов // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*. – 2025. – Т. 25, № 1. – С. 62–71.

Поступила в редакцию 5 июля 2025 г.

#### Сведения об авторах

Подгорнов Федор Валерьевич – доцент кафедры физики наноразмерных систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9926-4799>, e-mail: [fedorpod@yahoo.de](mailto:fedorpod@yahoo.de).

Гавриляк Алина Маратовна – аспирант, ассистент, кафедра оптоинформатики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9179-6945>, e-mail: [gavriliakam@susu.ru](mailto:gavriliakam@susu.ru).

Гавриляк Максим Витальевич – ассистент, кафедра оптоинформатики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация; младший научный сотрудник, Лаборатория нелинейной оптики, Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Российская Федерация, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8299-9695>, e-mail: [gavriliakmv@susu.ru](mailto:gavriliakmv@susu.ru).

---

*Bulletin of the South Ural State University*  
*Series "Mathematics. Mechanics. Physics"*  
2025, vol. 17, no. 3, pp. 61–70

---

DOI: 10.14529/mmph250307

## THE ROLE OF IMPURITY IONS IN NONLINEAR DIELECTRIC RESPONSE FORMATION OF NEMATIC LIQUID CRYSTAL CELL

F.V. Podgornov<sup>1</sup>, A.M. Gavrilyak<sup>1</sup>, M.V. Gavrilyak<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Institute of Electrophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

E-mail: [gavrilyak.maksim@yandex.ru](mailto:gavrilyak.maksim@yandex.ru)

Abstract. The study considers the nonlinear dielectric response of a nematic liquid crystal (NLC). Odd harmonics are found in the dielectric response in the low-frequency region of the spectrum from 0.5

mHz to 600 Hz. The transporting of impurity ions causes two relaxation effects: space charge polarization and the formation of electric double layers.

*Keywords: nematic liquid crystals; impurity ions; space charge polarization; double electric layers; nonlinear dielectric spectroscopy.*

### References

1. Yang Y., Forbes A., Cao L. A Review of Liquid Crystal Spatial Light Modulators: Devices and Applications. *Opto-Electron. Sci.*, 2023, Vol. 2, no. 8, p. 230026. DOI: 10.29026/oes.2023.230026.
2. Buske P., Hofmann O., Bonnhoff A., Stollenwerk J., Holly C. High Fidelity Laser Beam Shaping Using Liquid Crystal on Silicon Spatial Light Modulators as Diffractive Neural Networks. *Opt. Express*, 2024, Vol. 32, no. 5, p. 7064. DOI: 10.1364/OE.507630.
3. Yin K., Hsiang E.-L., Zou J., Li Y., Yang Z., Yang Q., Lai P., Lin C., Wu S. Advanced Liquid Crystal Devices for Augmented Reality and Virtual Reality Displays: Principles and Applications. *Light Sci. Appl.*, 2022, Vol. 11, no. 1, pp. 1–22. DOI: 10.1038/s41377-022-00851-3.
4. Gao Z., Ning H., Yao R., Xu W., Zou W., Guo C., Luo D., Xu H., Xiao J. Mini-LED Backlight Technology Progress for Liquid Crystal Display. *Crystals*, 2022, Vol. 12, no. 3, p. 313. DOI: 10.3390/cryst12030313.
5. Valyukh S., Arwin H., Chigrinov V., Kwok H.S. On Liquid Crystal Diffractive Optical Elements Utilizing Inhomogeneous Alignment. *Opt. Express*, 2012, Vol. 20, no. 14, pp. 15209–15221. DOI: 10.1364/OE.20.015209.
6. Belyaev V.V., Solomatin A.S., Kumar S., Chausov D.N., Belyaev A.A., Margaryan A.L., Akopiyan N.G. Дифракционные решетки с поверхностью микровыступов из оптически анизотропного материала (Diffraction Gratings Made from Optically Anisotropic Material with Surface Microrelief). *Opticheskii Zhurnal*, 2021, Vol. 88, no 1, pp. 44–52. (in Russ.). DOI: 10.17586/1023-5086-2021-88-01-44-52
7. Zhang R., Zhang Zh., Han J., Yang L., Li J., Song Z., Wang T., Zhu J. Advanced Liquid Crystal-Based Switchable Optical Devices for Light Protection Applications: Principles and Strategies. *Light Sci. Appl.*, 2023, Vol. 12, no. 1, p. 11. DOI: 10.1038/s41377-022-01032-y.
8. Kudreyko A., Chigrinov V., Neyts K., Chausov D., Perestoronina A. Photonic Devices with Multi-Domain Liquid Crystal Structures. *Crystals*, 2024, Vol. 14, no. 6, p. 512. DOI: 10.3390/cryst14060512.
9. Wu K., Sun J., Gao L., Xing H., Cai M., Zhao T., Yang C., Ye W., Kong X. Highly Sensitive and Transparent Flexible Temperature Sensor Based on Nematic Liquid Crystals. *Liq. Cryst.*, 2022, Vol. 49, no. 3, pp. 372–379. DOI: 10.1080/02678292.2021.1970834.
10. Kottapalli A.G.P., Asadnia M., Miao J.M., Barbastathis G., Triantafyllou M.S. A Flexible Liquid Crystal Polymer MEMS Pressure Sensor Array for Fish-like Underwater Sensing. *Smart Mater. Struct.*, 2012, Vol. 21, no. 11, p. 115030. DOI: 10.1088/0964-1726/21/11/115030.
11. Luan Ch., Luan H., Luo D. Application and Technique of Liquid Crystal-Based Biosensors. *Micromachines*, 2020, Vol. 11, no. 2, p. 176. DOI: 10.3390/mi11020176.
12. Jimenez-Girela A., Merino-Pérez D., Campos-Jara A., Negrín J.S., Parejo P.G., Álvarez-Herrero A. Polarization-Correction Device with Liquid Crystals for Quantum-Key-Distribution Satellite Systems. *Phys. Rev. Appl.*, 2025, Vol. 23, no. 6, p. 064070. DOI: 10.1103/8plr-m6n8.
13. Okada H., Watanabe T., Yokotsuka S., Terazawa A. Optical Quantum Computing Using Liquid Crystal Devices. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2024, Vol. 768, no. 7, pp. 59–90. DOI: 10.1080/15421406.2024.2342610.
14. Chi W. S., Jeon H., Kim S. J., Kim D. J., Kim J. H. Ionic Liquid Crystals: Synthesis, Structure and Applications to I<sub>2</sub>-Free Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells. *Macromol. Res.*, 2013, Vol. 21, pp. 315–320. DOI: 10.1007/s13233-013-1097-3.
15. Garbovskiy Y., Glushchenko I. Nano-Objects and Ions in Liquid Crystals: Ion Trapping Effect and Related Phenomena. *Crystals*, 2015, Vol. 5, no. 4, pp. 501–533. DOI: 10.3390/cryst5040501.
16. Garbovskiy Y. Time-dependent Electrical Properties of Liquid Crystal Cells: Unravelling the Origin of Ion Generation. *Liq. Cryst.*, 2018, Vol. 45, no. 10, pp. 1540–1548. DOI: 10.1080/02678292.2018.1455228.

17. Choi J.C., Lee J.W., Lee D.J., Park Y., Kim H.R. Flicker-Free Fringe-Field Switching Liquid Crystal Display Operable at Extremely Low Frequencies for Power Saving. *Adv. Eng. Mater.*, 2021, Vol. 23, no. 9, p. 2100174. DOI: 10.1002/adem.202100174.
18. Xu D., Peng F., Chen H., Yuan J., Wu S.T., Li M.C., Lee S.L., Tsai W.C. Image Sticking in Liquid Crystal Displays with Lateral Electric Fields. *J. Appl. Phys.*, 2014, Vol. 116, no. 19, p. 193102. DOI: 10.1063/1.4902083.
19. Garbovskiy Y. Conventional and Unconventional Ionic Phenomena in Tunable Soft Materials Made of Liquid Crystals and Nanoparticles. *Nano Express*, 2021, Vol. 2, no. 1, p. 012004. DOI: 10.1088/2632-959X/abe652.
20. Palomares L.O., Reyes J.A., Barbero G. Optical Response of a Nematic Sample Submitted to a Periodic External Electric Field: Role of the Ionic Impurities. *Phys. Lett. A*, 2004, Vol. 333, no. 1-2, pp. 157–163. DOI: 10.1016/j.physleta.2004.10.047.
21. Chausov D.N., Kurilov A.D., Kazak A.V., Smirnova A.I., Velichko V.K., Gevorkyan E.V., Rozhkova N.N., Usol'tseva N.V. Dielectric Properties of Liquid Crystalline Composites Doped with Nano-Dimensional Fragments of Shungite Carbon. *Liq. Cryst.*, 2019, Vol. 46, no. 9, pp. 1345–1352. DOI: 10.1080/02678292.2019.1566503.
22. Shcherbinin D. P., Konshina E. A. Ionic Impurities in Nematic Liquid Crystal Doped with Quantum Dots CdSe/ZnS. *Liq. Cryst.*, 2017, Vol. 44, no. 4, pp. 648–655. DOI: 10.1080/02678292.2016.1227483.
23. Naemura S. Liquid-Crystal-Material Technologies for Advanced Display Applications. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2000, Vol. 8, no. 1, pp. 5–9. DOI: 10.1889/1.1828702.
24. Gavrilyak A.M., Gavrilyak M.V., Boronin V.A., Podgornov F.V. Contribution of Impurity Ions to Spatial-Temporal Distribution of Local Electric Field in Nematic Liquid Crystal Cell. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Mathematics. Mechanics. Physics"*, 2025, Vol. 17 no. 2, pp. 69–81. (in Russ.). DOI: 10.14529/mmph250208.
25. Palto S.P., Blinov L.M., Podgornov F.V., Haase W. Modeling Electrooptical Effects in Ferroelectric Liquid Crystals. 1. Basic Equations and Experimental Tests. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2004, Vol. 410, no. 1, pp. 95–104. DOI: 10.1080/15421400490436133.
26. Podgornov F.V., Haase W., Gavrilyak M., Boronin V., Haase W. Mechanism of Electrooptic Switching Time Enhancement in Ferroelectric Liquid Crystal/Gold Nanoparticles Dispersion. *Liq. Cryst.*, 2018, Vol. 45, no. 11, pp. 1594–1602. DOI: 10.1080/02678292.2018.1458256.
27. Karaawi A.R., Gavrilyak M.V., Boronin V.A., Gavrilyak A.M., Kazachonok J.V., Podgornov F.V. Direct Current Electric Conductivity of Ferroelectric Liquid Crystals–Gold Nanoparticles Dispersion Measured with Capacitive Current Technique. *Liq. Cryst.*, 2020, Vol. 47, no. 10, pp. 1507–1515. DOI: 10.1080/02678292.2020.1740951.
28. Pagliusi P., Zappone B., Cipparrone G., Barbero G. Molecular Reorientation Dynamics due to Direct Current Voltage-Induced Ion Redistribution in Undoped Nematic Planar Cell. *J. Appl. Phys.*, 2004, Vol. 96, no. 1, pp. 218–223. DOI: 10.1063/1.1756693.
29. Konshina E.A., Shcherbinin D.P. Study of Dynamic Light Scattering in Nematic Liquid Crystal and Its Optical, Electrical and Switching Characteristics. *Liq. Cryst.*, 2018, Vol. 45, no. 2, pp. 292–302. DOI: 10.1080/02678292.2017.1323353.
30. Infusino M., De Luca A., Ciuchi F., Ionescu A., Scaramuzza N., Strangi G. Optical and Electrical Characterization of a Gold Nanoparticle Dispersion in a Chiral Liquid Crystal Matrix. *J. Mater. Sci.*, 2014, Vol. 49, no. 4, pp. 1805–1811. DOI: 10.1007/s10853-013-7868-6.
31. Korniychuk P.P., Gabovich A.M., Singer K., Voitenko A.I., Reznikov Y.A. Transient and Steady Electric Currents through a Liquid Crystal Cell. *Liq. Cryst.*, 2010, Vol. 37, no. 9, pp. 1171–1181. DOI: 10.1080/02678292.2010.490622.
32. Rybakov D.O., Belyaev V.V. Dvoynye elektricheskie sloi i ikh vliyanie na nizkochastotnyuyu di'elektricheskuyu pronitsaemost' 4-n-pentil-4'-cianobifenila (5CB) (Electrical Double Layers and their Effect on the Low-Frequency Dielectric Permittivity of 4-n-Pentyl-4'-Cyanobiphenyl (5CB)). *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2018, Vol. 18, no. 4, pp. 40–47. (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2018.4.40
33. Belyaev B.A., Drokin N.A., Maslennikov A.N. Vliyanie ionnykh primesey na impedansnye spektry zhidkikh kristallov (Influence of Ionic Impurities on Impedance Spectra of Liquid Crystals). *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2012, no. 4(42), pp. 39–46. (in Russ.).

34. Belyaev B.A., Drokin N.A. Impedance spectroscopy investigation of electrophysical characteristics of the electrode-liquid crystal interface. *Phys. Solid State*, 2015, Vol. 57, no. 1, pp. 181–187. DOI: 10.1134/S1063783415010060.
35. Sawada A. Dielectric Process of Space-Charge Polarization for an Electrolytic Cell with Blocking Electrodes. *J. Chem. Phys.*, 2008, Vol. 129, no. 6, p. 064701. DOI: 10.1063/1.2965877.
36. Sawada A., Manaka T. Electrode Process of Mobile Ions in Generating Space-Charge Polarization. *Phys. Rev. E*, 2024, Vol. 109, no. 3, p. 034802. DOI: 10.1103/PhysRevE.109.034802.
37. Sawada A. Modeling of Electrode Polarization for Electrolytic Cells with a Limited Ionic Adsorption. *Phys. Rev. E*, 2013, Vol. 88, no. 3, p. 032406. DOI: 10.1103/PhysRevE.88.032406.
38. Alexe-Ionescu A. L., Barbero G., Lelidis I. Complex Dielectric Constant of a Nematic Liquid Crystal Containing Two Types of Ions: Limit of Validity of the Superposition Principle. *J. Phys. Chem. B*, 2009, Vol. 113, no. 44, pp. 14747–14753. DOI: 10.1021/jp906479w.
39. Iwamoto M. The Dielectric Dispersion of Insulating Films with Long-Range Movements of Charge Carriers. *J. Appl. Phys.*, 1995, Vol. 77, no. 10, pp. 5314–5321. DOI: 10.1063/1.359287.
40. Leblond J.M., Douali R., Legrand C., Dabrowski R. Nonlinear Dielectric Spectroscopy: A Method to Determine Physical Parameters of Ferroelectric Liquid Crystals. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2006, Vol. 36, no. 2, pp. 157–163. DOI: 10.1051/epjap:2006104.
41. Tanaka K., Ichikawa M., Kimura Y. Nonlinear Dielectric Spectroscopy of MHPOBC. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2007, Vol. 477, no. 1, pp. 195–204. DOI: 10.1080/15421400701684020.
42. Derfel G., Barbero G. Numerical Study of Ionic Contribution to Susceptibility and Impedance of Dielectric Liquid Layer. *J. Mol. Liq.*, 2009, Vol. 150, no. 1-3, pp. 43–50. DOI: 10.1016/j.molliq.2009.09.011.
43. Richert R. Nonlinear Dielectric Effects in Liquids: A Guided Tour. *J. Phys. Condens. Matter*, 2017, Vol. 29, no. 36, p. 363001. DOI: 10.1088/1361-648X/aa7cc4.
44. Sawada A., Tarumi K., Naemura S. Novel Characterization Method of Ions in Liquid Crystal Materials by Complex Dielectric Constant. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, Vol. 38, no. 3R, p. 1423. DOI: 10.1143/JJAP.38.1423.
45. Podgornov F.V., Ryzhkova A.V., Haase W. Dynamics of Nonlinear Electrophoretic Motion of Dielectric Microparticles in Nematic Liquid Crystal. *J. Mol. Liq.*, 2018, Vol. 267, pp. 345–352. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.02.053.
46. Gavriilyak M.V., Gavriilyak A.M., Boronin V.A., Podgornov F.V. Vklad polyarizatsii prostranstvennogo zaryada v nelineynyy spektr dielektricheskoy pronitsayemosti nematicheskogo zhidkogo kristalla: kompyuternoe modelirovanie (Contribution of Space Charge Polarization to Nonlinear Permittivity Spectrum of Nematic Liquid Crystal: Computer Simulation). *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2025, Vol. 25, no. 1, pp. 62–71. (in Russ.) DOI: 10.18083/LCAppl.2025.1.62.

Received July 5, 2025

### Information about the authors

Podgornov Fedor Valerievich is Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Physics of Nanoscale Systems Department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9926-4799>, e-mail: [fedorpod@yahoo.de](mailto:fedorpod@yahoo.de).

Gavriilyak Alina Maratovna is Post-graduate Student, Assistant, Department of Optoinformatics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9179-6945>, e-mail: [gavriliakam@susu.ru](mailto:gavriliakam@susu.ru).

Gavriilyak Maksim Vitalievich is Assistant, Department of Optoinformatics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation; Junior Research Fellow, Laboratory of Nonlinear Optics, Institute of Electrophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8299-9695>, e-mail: [gavriliakmv@susu.ru](mailto:gavriliakmv@susu.ru).