

УДК 532.783

Грідякіна О. В.<sup>1</sup>, к.ф.-м.н.,  
Бордюг Г. Б.<sup>2</sup>, к.ф.-м.н.,  
Білоус О. І.<sup>3</sup>, д.ф.-м.н., доц.

### Нелінійно-оптичні властивості рідкокристалічних середовищ на основі метал-алканоатів

<sup>1,2,3</sup>Національний авіаційний університет,  
03058, м.Київ, просп. Космонавта Комарова, 1,  
e-mail: <sup>1</sup>morhin@ukr.net  
<sup>2</sup>a.bordyuh@gmail.com  
<sup>3</sup>bilous2013@gmail.com

O. V. Gridyakina<sup>1</sup>, PhD.,  
H. B. Bordyuh<sup>2</sup>, PhD.,  
O. I. Bilous<sup>3</sup>, Dr. Sci.

### Nonlinear optical properties of metal-alkanoate liquid crystalline media

<sup>1,2,3</sup>National Aviation University, 03058, Kyiv,  
Kosmonavta Komarova ave. 1,  
e-mail: <sup>1</sup>morhin@ukr.net  
<sup>2</sup>a.bordyuh@gmail.com  
<sup>3</sup>bilous2013@gmail.com

В роботі наведено результати оптичних та нелінійно-оптичних досліджень властивостей ліотропних іонних рідких кристалів капрілату калію, допованих електрохромними домішками віологенів, та смектичних стекл термотропних іонних рідких кристалів алканоатів кобальту. Показано, що досліджувані матеріали характеризуються кубічною оптичною нелінійністю і мають значення кубічної нелінійної сприйнятливості  $\chi^{(3)}$  та гіперполяризованості  $\gamma$ , наближені до кращих характеристик органічних барвників. Запропоновано механізм нелінійного відгуку, пов'язаний з нелінійною поляризацією  $\pi$ -електронів у полі лазерного випромінювання.

Ключові слова: іонний рідкий кристал, віологен, оптична спектроскопія, оптична нелінійність.

*This work presents the analysis of experimental data on studies of optical and nonlinear optical properties of lyotropic ionic liquid crystals of potassium caprylate doped with electrochromic viologen admixtures, and smectic glasses of thermotropic ionic liquid crystals of cobalt alkanoates homologous series (number of carbon atoms in alkanoate chain  $n = 7, 9, 11$ ) and their multicomponent mixtures. Prior to performing nonlinear optical experiment the optical absorption spectra for all samples were investigated. Laser induced dynamic grating recording under the action of the nanosecond laser pulses was realized, observed and analyzed for proposed absorptive media. It was discovered that studied materials are characterized by cubic optical nonlinearity and have values of cubic nonlinear susceptibility  $\chi^{(3)}$  and hyperpolarizability  $\gamma$  comparable to the best characteristics of organic dyes. The possible mechanism of nonlinear response in studied systems was considered on the base of obtained data. The nonlinear response mechanism is connected with nonlinear polarization of  $\pi$ -electrons in the field of laser radiation.*

Key Words: ionic liquid crystal, viologen, optical spectroscopy, optical nonlinearity.

Статтю представив академік НАН України, д.ф.-м.н., проф. Булавін Л.А.

### Вступ

Окрім традиційного використання в дисплейних технологіях рідкокристалічні матеріали все більше застосовують в нанотехнологіях, оптоелектроніці, лазерній техніці, фотоніці та голографічному записі. Зокрема в останньому випадку свою ефективність показали іонні рідкі кристали на основі алканоатів металів, які здатні утворювати як ліотропну, так і термотропну мезофазу [1]. Термотропні іонні рідкі кристали (ТІРК) здатні легко переохолоджуватись з утворенням смектичного скла та мають власне поглинання у видимому діапазоні довжин хвиль [2].

Поглинання ліотропних іонних рідких кристалів (ЛІРК) зумовлене введенням барвників або фото- та електрочутливих домішок, які не порушують рідкокристалічну структуру матричної речовини [3]. Завдяки поглинанню в області лазерного випромінювання такі рідкокристалічні матеріали характеризуються великим і швидким нелінійно-оптичним відгуком і є перспективними середовищами для здійснення голографічного запису.

### Об'єкти та методи дослідження

Зразки для проведення оптичних та нелінійно-оптичних досліджень отримували наступним чином:

1) ЛІРК, утворений змішуванням порошку каприлату калію з водою у ваговому співвідношенні 1:1 ( $C_7H_{15}COO K^+ : H_2O$ ), містив 2% мас. електрохромних домішок двох сполук із класу віологенів:  $N,N'$ -дигептил-4,4'-дипіридил диброміду ( $ГД^{2+}2Br^-$ ) та  $N,N'$ -ди(2-карбоксіетил)-4,4'-дипіридил дихлориду ( $КЕД^{2+}2Cl^-$ ), які розрізняються замісниками при атомах азоту та протиіонами. Така концентрація домішки дозволяє зберегти РК-структуру [3-5], водночас забезпечуючи електрохромні властивості зразків, які полягають у здатності забарвлюватися під дією зовнішнього електричного поля внаслідок відновлення молекул віологенів.

2) Алканоати кобальту у вигляді полікристалічного порошку нагрівали вище температури переходу кристал-мезофаза, а потім швидко охолоджували до кімнатної температури, отримуючи смектичне скло. Такі стекла термотропних іонних рідких кристалів були отримані для наступних сполук: трьох представників гомологічного ряду алканоатів кобальту ( $C_nH_{2n+1}COO^-$ ) $_2Co^{2+}$  ( $n = 7, 9, 11$ ); бінарних сумішей  $Co, Li|(C_7H_{15}COO)_2$  (0,5:0,5 молярної концентрації) та  $Co, K|(C_7H_{15}COO)_2$  (0,5:0,5 молярної концентрації); потрійної суміші  $Co, Li, K|(C_7H_{15}COO)_2$  (0,5:0,25:0,25 молярної концентрації). У попередніх роботах було показано, що всі досліджувані речовини під час плавлення утворюють рідкий кристал типу смектик А [2, 6] і здатні утворювати стабільне смектичне скло.

Всі дослідження проводили за кімнатної температури у скляних сандвіч-комірках, які у випадку зразків ЛІРК-віологен були додатково вкриті з внутрішнього боку шаром ІТО-електродів, щоб забезпечити можливість подавання напруги. Товщину зразків задавали за допомогою тefлонових спейсерів, а самі комірки заклеювали по периметру, щоб уникнути доступу повітря та запобігти псуванню зразків.

Для дослідження оптичних властивостей застосовували метод оптичної спектроскопії і отримували спектри поглинання зразків у видимому діапазоні.

Для дослідження нелінійно-оптичних властивостей та визначення основних голографічних характеристик зразків застосовували методи динамічної голографії та вимірювання нелінійного пропускання середовища. Голографічний запис ґраток здійснювали на основі двопроменевої схеми, використовуючи випромінювання другої

гармоніки імпульсного Nd:YAP лазера, що працював в режимі модуляції добротності ( $TEM_{00}$  мода, довжина хвилі  $\lambda = 539.8$  нм, тривалість одного імпульсу  $\tau = 20$  нс, частота імпульсів  $\nu = 3$  Гц). Лінійно поляризоване в горизонтальній площині лазерне випромінювання розділялося на два промені приблизно однакової інтенсивності, які зводились на коміріці зі зразком під заданим кутом. Досліджували ефективність самодифракції, змінюючи кут зведення променів та інтенсивність лазерного випромінювання.

Для дослідження кінетики затухання ґраток в мікросекундному діапазоні записані голографічні ґратки зчитували тестуючим неполяризованим випромінюванням неперервного He-Ne лазера (потужність  $P = 2$  мВт,  $\lambda = 632.8$  нм).

### Експериментальні дані

#### Оптичні властивості

Поглинання композитів ЛІРК-віологен зумовлене домішками віологенів, молекули яких відновлюються під дією зовнішнього поля і в залежності від величини поданої напруги, можуть перебувати в трьох формах: дикатіон віологену (безбарвний), синій катіон-радикал та червоний димер. У разі внесення віологену  $ГД^{2+}2Br^-$  у ліотропну рідкокристалічну матрицю його відновлення відбувається поетапно та характеризується утворенням як катіон-радикалів, так і димерів.

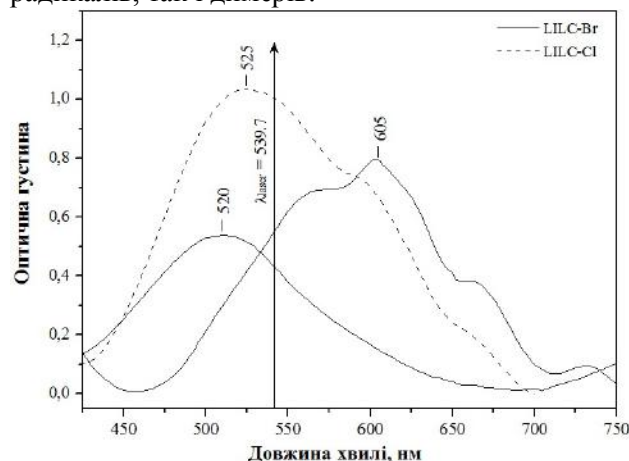


Рис. 1. Спектр поглинання зразків ЛІРК- $ГД^{2+}2Br^-$  (суцільна лінія) та ЛІРК- $КЕД^{2+}2Cl^-$  (пунктирна лінія).

Спектр поглинання композита ЛІРК- $ГД^{2+}2Br^-$  у залежності від прикладеної напруги може мати смуги з максимумом на  $\sim 605$  нм ( $U = 2$  В, синій колір) або  $\sim 520$  нм ( $U = 4$  В, червоний колір). Обидві відновлені форми віологенів у композиті ЛІРК- $КЕД^{2+}2Cl^-$  утворюються одночасно, а його спектр характеризується

смугою поглинання з основним максимумом на  $\sim 525$  нм ( $U = 3-3,5$  В, фіолетовий колір) (Рис. 1).

Усі досліджувані смектичні стекла алканоатів кобальту також поглинають світло у видимому діапазоні (Рис. 2). Це поглинання можна розглядати в термінах теорії поля лігандів [7, 8] як наслідок збудження октаедричних (координаційне число = 6) комплексів іонів кобальту, для яких зафіксовано два характерних електронних переходи. Максимум  $\sim 530$  нм відповідає електронному переходу  ${}^4T_{1g}({}^4F) \rightarrow {}^4T_{1g}({}^4P)$ , а максимум  $\sim 565$  нм –  ${}^4T_{1g}({}^4F) \rightarrow {}^4A_{2g}({}^4F)$ .

У сумішах зафіксовано вигинання смуги поглинання в області  $\sim 620$  нм ( ${}^4A_2({}^4F) \rightarrow {}^4T_1({}^4P)$  перехід). Це свідчить, що з октаедричними комплексами в зазначених сумішах ймовірно існують також комплекси з тетраедричною координацією. Коефіцієнт поглинання  $\alpha$  бінарних та потрійних систем, на основі на  $\text{CoC}_8$  в 2-3 рази більше, ніж для чистого  $\text{CoC}_8$ .

#### Нелінійно-оптичні властивості

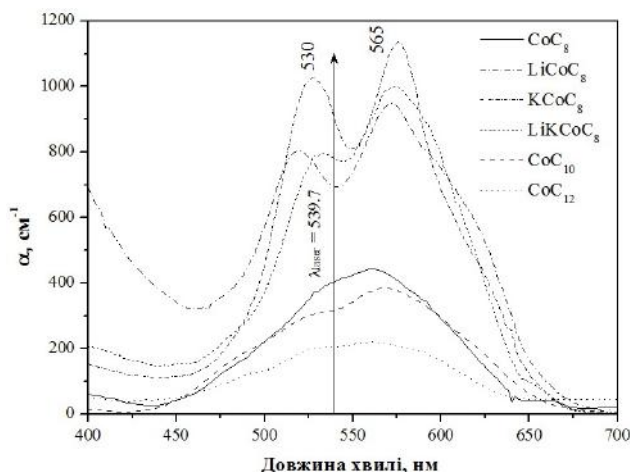


Рис. 2. Спектри поглинання смектичних стекел ТІРК.

Для запису дифракційних динамічних ґраток в зразках стекел ТІРК та композитів ЛІРК-віологен було достатньо одного лазерного імпульсу, для всіх зразків спостерігався ефект самодифракції. При цьому зазвичай спостерігали кілька дифракційних порядків. Цей факт, а також малість величини параметру Кука-Кляйна ( $Q < 0,1$ ) вказують на те, що записані ґратки є тонкими. Дифракційні ґратки записувалися внаслідок модуляції комплексного показника заломлення в інтерференційному полі двох зведених на зразку лазерних променів.

Спочатку оцінювали залежність оптичної густини зразків від інтенсивності лазерного випромінювання, щоб визначити природу

записуваних ґраток. В робочому діапазоні інтенсивностей нелінійне поглинання неістотне, тобто записані ґратки в обох випадках були переважно фазовими. При цьому оптична густина зразків ЛІРК-віологен за робочої інтенсивності випромінювання дорівнювала  $D = 0,45-0,46$ , а для зразків ТІРК –  $D = 1,0-1,1$ .

Дифракційну ефективність  $\eta$  (відношення  $I_1/I_0$ ) стекел ТІРК і композитів ЛІРК-віологен вимірювали в першому порядку самодифракції, і для всіх досліджуваних зразків вона квадратично залежала від інтенсивності записуючого лазерного випромінювання, що вказує на наявність у зразках кубічної оптичної нелінійності. При цьому зразки ЛІРК-ГД<sup>2+</sup>2Br, які містили димери віологенів, мали вдвічі більшу дифракційну ефективність, ніж ті самі зразки, які містили катіон-радикали, а смектичні стекла індивідуальних гомологів алканоатів кобальту мали більш високі значення дифракційної ефективності у порівнянні із сумішами. Експериментальні дані, отримані в результаті серії досліджень з різними зразками, показали задовільну повторюваність результатів [6, 9] Типовий графік дифракційної ефективності для досліджених зразків наведено на Рис. 3.

При дослідженні кінетики стирання записаних ґраток для всіх зразків спостерігали експоненціальну часову залежність інтенсивності в першому порядку дифракції (Рис. 4). Для смектичних стекел ТІРК стала затухання  $\tau$  для періоду ґратки  $\Lambda = 16$  мкм становила 60 мкс, а

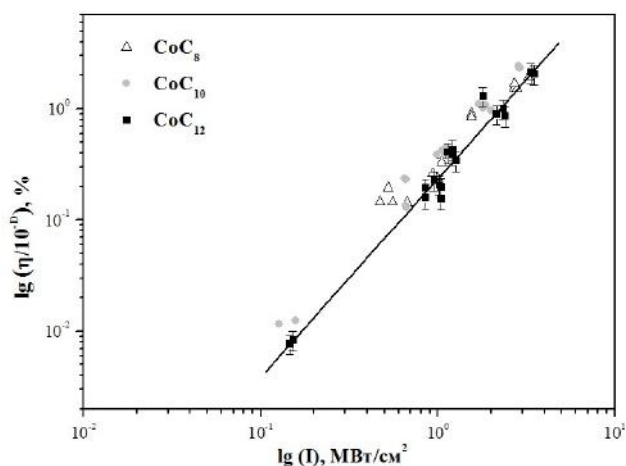


Рис. 3. Залежність дифракційної ефективності ( $\eta$ ) фазової ґратки від інтенсивності лазерного випромінювання. Для композитів ЛІРК-віологен стала затухання  $\tau$  для періоду ґратки  $\Lambda = 15$  мкм становила 25 мкс. Така залежність характерна для теплових ґраток, які виникають в зразках при поглинанні записуючого лазерного випромінювання. Унаслідок інерційності фотореєструючої системи

відстежували релаксацію ґраток, починаючи з 0,5 мкс, тобто спостерігали стирання залишкових теплових ґраток у мікросекундному діапазоні часу. Але, порівняння дифракційної ефективності теплової ґратки  $\eta_T$  з дифракційною ефективністю ґратки, записаної в режимі самодифракції  $\eta$ , свідчить, що  $\eta_T \ll \eta$  ( $\eta/\eta_T > 100$ ), тобто записані в режимі самодифракції дифракційні ґратки не зумовлені тепловим механізмом.

### Обговорення результатів

Основними показниками наявної у досліджуваних зразках кубічної оптичної нелінійності є коефіцієнт нелінійної рефракції  $n_2$  та відповідне значення кубічної нелінійної

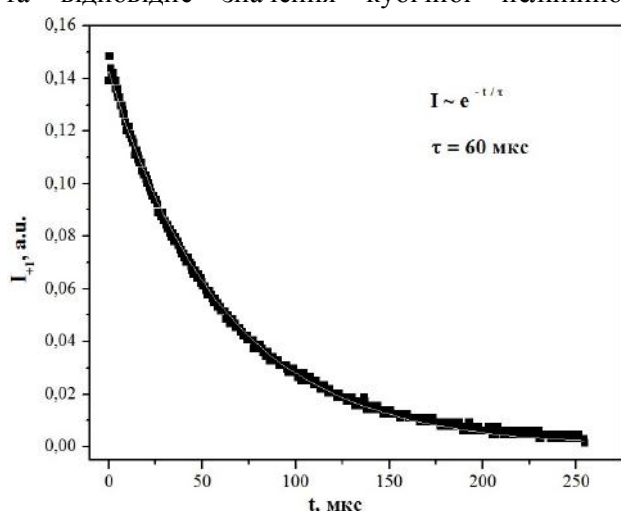


Рис. 4. Кінетика стирання записаних ґраток в мікросекундному діапазоні для зразка смектичного скла октаоату кобальту. сприйнятливості  $\chi^{(3)}$ . Коефіцієнт нелінійної рефракції  $n_2$  визначали за експериментальною залежністю  $\eta = f(I^2)$  за виразом:

$$|n_2| = \frac{\lambda}{\pi \cdot d \cdot m \cdot (I_1 + I_2)} \cdot \sqrt{\frac{\eta}{T}}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі лазерного випромінювання,  $d$  – товщина, на якій відбувався нелінійний набіг фази (товщина комірки у випадку смектичних стекол або фоточутливого шару продуктів відновлення віологенів у випадку композитів ЛІРК-віологен),  $m$  – глибина модуляції,  $I_1, I_2$  – інтенсивності лазерних пучків, які інтерферують на досліджуваному зразку,  $T$  – пропускання.

Значення гіперполяризованості  $\gamma$  та кубічної нелінійної сприйнятливості  $\chi^{(3)}$  за обраховували формулами:

$$\gamma = \frac{\chi^{(3)}}{N \cdot L^4}, \quad (2)$$

$$\chi^{(3)} = n_2 \cdot \epsilon_0 \cdot c \cdot (n_0)^2 = \gamma \cdot N \cdot L^4 \quad (3)$$

де  $N$  – концентрація (нелінійно-оптичних центрів у випадку смектичних стекол або молекул у випадку композитів ЛІРК-віологен),  $L$  – фактор локального поля,  $\epsilon_0$  – діелектрична стала,  $c$  – швидкість світла,  $n_0$  – середній показник заломлення.

Розраховані з експериментальних даних величини нелінійно-оптичних параметрів  $n_2, \chi^{(3)}$  та  $\gamma$  наведено в Таблиці 1. Усі дані подано в системі СГС, яка є загальноживаною в нелінійній оптиці; також наведено вираз для переходу від одиниць СГС до одиниць СІ.

Отримані для композитів ЛІРК-віологен та смектичних стекол ЛІРК високі значення нелінійної сприйнятливості та гіперполяризованості близькі за величинами до найкращих характеристик органічних барвників [10].

Таблиця 1

Нелінійно-оптичні параметри композитів ЛІРК-віологен та смектичних стекол ЛІРК

Зразок	$n_2$	$\chi^{(3)}$	$\gamma$
	см <sup>2</sup> ·Вт <sup>-1</sup>	СГС	СГС
КЕД <sup>2+</sup> 2СІ (димери)	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$0,8 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-28}$
ГД <sup>2+</sup> 2Вг (димери)	$3 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-28}$
ГД <sup>2+</sup> 2Вг (катион-радикал)	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$0,6 \cdot 10^{-8}$	$0,6 \cdot 10^{-28}$
CoC <sub>8</sub>	$11,2 \cdot 10^{-10}$	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$6,0 \cdot 10^{-30}$
CoC <sub>10</sub>	$8,3 \cdot 10^{-10}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$5,3 \cdot 10^{-30}$
CoC <sub>12</sub>	$4,5 \cdot 10^{-10}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-30}$
Co,Li C <sub>8</sub>	$4,6 \cdot 10^{-10}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-30}$
Co,K C <sub>8</sub>	$5,3 \cdot 10^{-10}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-30}$
Co,Li,K C <sub>8</sub>	$4,6 \cdot 10^{-10}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^{-30}$

$$\chi^{(3)}(CГС) = \frac{9}{4 \cdot \pi} \cdot 10^8 \chi^{(3)}(CІ)$$

### Механізм нелінійно-оптичного запису

Відомо, що ефект нелінійної поляризації в полі інтенсивного лазерного випромінювання, коли величина поляризації нелінійно залежить від напруженості зовнішнього електричного поля, можуть проявляти органічні речовини, молекули яких містять делокалізовані  $\pi$ -електрони [10].

Запис дифракційних ґраток у зразках ЛІРК-віологен відбувається у забарвленому шарі

продуктів відновлення віологенів, що утворюється на катоді внаслідок дії електричного поля. До складу вихідних (невідновлених) молекул віологенів входять два дипіридилієві кільця, на яких зосереджено слабо делокалізовані  $\pi$ -електрони. При цьому після зумовленого електричним полем відновлення молекул до катіон-радикалів і димерів степінь делокалізації їх  $\pi$ -електронів різко зростає. У той час як для вихідних зразків ЛІРК-віологен (прозорих) голографічний запис не спостерігали, зразки, що містили катіон-радикали або димери віологенів, демонстрували дифракційну ефективність, яка виявилася більшою в останньому випадку. Відповідно, значення кубічної нелінійної сприйнятливості ( $\chi^{(3)}$ ) і гіперполяризовності ( $\gamma$ ) також були вищими у випадку димерів (табл. 1).

У зразках ТІРК основними нелінійно-оптичними центрами є комплекси, утворені катіонами кобальту в оточенні атомів кисню карбоксильних груп алканоксидних лігандів, в яких розміщуються делокалізовані  $\pi$ -електрони.

Для гомологічного ряду алканоксидів кобальту величини нелінійної діелектричної сприйнятливості  $\chi^{(3)}$  зростають зі зменшенням довжини алкільного ланцюга, тобто зі збільшенням концентрації нелінійно-оптичних центрів. При цьому атоми кисню карбоксильних груп координують одночасно кілька сусідніх катіонів кобальту, що призводить до утворення координаційної сітки в межах катіон-аніонного прошарку. Оскільки в катіон-аніонному прошарку міститься велика кількість карбоксильних груп з делокалізованими  $\pi$ -електронами, то смектичні стекла здатні до колективної електронної поляризації, що і зумовлює появу посиленого нелінійно-оптичного відгуку середовища.

Ще одним важливим фактором, що сприяє збільшенню величини дифракційної ефективності та гіперполяризовності, є потрапляння довжини хвилі збуджуючого лазерного випромінювання ( $\lambda = 539.8$  нм) у смугу поглинання записуючого середовища. Згідно зі спектральними даними для композитів ЛІРК-віологен (Рис.1), максимум поглинання димерів лежить поблизу  $\lambda = 520-525$  нм, а для досліджених ТІРК кобальту максимума поглинання лежать в області  $\lambda \sim 530$  нм та  $\lambda \sim$

560 нм (Рис.2). Отже, для зразків ЛІРК, що містять віологени в димерній формі, та ТІРК алканоксидів кобальту ефект резонансного підсилення відіграє значну роль.

Високі значення  $\chi^{(3)}$  і  $\gamma$ , а також малий внесок теплових ґраток в нелінійні властивості вигідно відрізняють композити ЛІРК-віологен та смектичні стекла ТІРК алканоксидів кобальту від інших середовищ. Зокрема, у порівнянні з такими традиційними анізотропними матеріалами, як нематичні рідкі кристали, у досліджуваних зразках був відсутній ефект переорієнтації молекул. Усі ці чинники роблять композити ЛІРК-віологен та смектичні стекла ТІРК алканоксидів кобальту перспективними матеріалами для голографічного запису.

#### Висновки

Отримано запис динамічних дифракційних ґраток на поглинаючих зразках композитів ліотропний іонний рідкий кристал (ЛІРК) – віологен та смектичних стеклах ТІРК алканоксидів кобальту. Для композитів ЛІРК-віологен і молекули алканоксидів кобальту у смектичних стеклах ТІРК містять делокалізовані  $\pi$ -електрони, запропоновано механізм запису дифракційних ґраток, пов'язаний з ефектом нелінійної поляризації в полі інтенсивного лазерного випромінювання.

Оскільки молекули віологенів у композитах ЛІРК-віологен і молекули алканоксидів кобальту у смектичних стеклах ТІРК містять делокалізовані  $\pi$ -електрони, запропоновано механізм запису дифракційних ґраток, пов'язаний з ефектом нелінійної поляризації в полі інтенсивного лазерного випромінювання.

Встановлено, що як у випадку композитів ЛІРК-віологен, так і у випадку смектичних стеклах ТІРК збільшенню величини спостережуваної дифракційної ефективності сприяло потрапляння довжини хвилі збуджуючого лазерного випромінювання у смугу поглинання записуючого середовища.

Для композитів ЛІРК-віологен та смектичних стеклах ТІРК оцінено значення нелінійної сприйнятливості ( $\chi^{(3)} \sim 10^{-8}$  esu) та гіперполяризовності ( $\gamma \sim 10^{-28}$  esu), які за порядком величини відповідають найкращим характеристикам органічних сполук за умови резонансного збудження.



## Список використаних джерел

## References

1. Polishchuk A. P. Metal-containing liquid-crystal phases / A. P. Polishchuk, T. V. Timofeeva. // Russian Chemical Reviews. – 1993. – №62. – P. 291–321.
2. Gridyakina A. V. Physical properties of liquid crystals in lead decanoate systems / A. V. Gridyakina, G. V. Klimusheva, A. P. Polishchuk. // Russian Journal of Physical Chemistry. – 2005. – №79. – P. 71–75.
3. Bordyuh A. B. Structure and intermolecular interactions in ionic liquid crystals doped with electrochromic viologen / A. B. Bordyuh, G. V. Klimusheva, A. P. Polishchuk. // Russian Journal of Physical Chemistry. – 2005. – №79. – P. 66–70.
4. Polishchuk A. P. Products of quaternization of 4,4'-Bipyridine with halogenated carboxylic acids. synthesis, structure, and photoreduction in the crystalline state / I. Yu. Polishchuk, L. G. Grineva, A. P. Polishchuk // Russian Journal of General Chemistry. – 1998. – Vol. 68. – N.4. – P. 609–616.
5. Bordyuh A. B. Dynamic grating recording in lyotropic ionic smectics of metal alkanoates doped with electrochromic impurities / A. B. Bordyuh, Yu. A. Garbovskiy, S. A. Bugaychuk // Optical Materials. – 2009. – Vol. 31. – P. 1109–1114.
6. Gridyakina A. V. Tunable optical and nonlinear optical response of smectic glasses based on cobalt alkanoates / Yu. A. Garbovskiy, A. V. Gridyakina, G. V. Klimusheva // Liquid Crystals. – 2010. – Vol.37 – P. 1411 — 1418.
7. Волков С. В. Спектроскопія розплавлених солей / С. В. Волков, К. Б. Яцимирский. – К.: Наукова думка, 1977. – 223 с.
8. Crabb E. Concepts in Transition Metal Chemistry / E. Crabb, E. Moore, L. Smart. – London: Royal Society of Chemistry, 2010. – 140 p.
9. Bordyuh A. B. Fast nonlinear optical mechanisms in Bi-Layered cells composed by lyotropic ionic liquid crystals with dye and viologen films/ A. B. Bordyuh, Yu. A. Garbovskiy, S. A. Bugaychuk // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2009 – Vol. 508 – P. 296–308.
10. Sakai T. Third order nonlinear optical properties of retinal derivatives / T. Sakai, Y. Kawabe, H. Ikeda // Applied Physics Letters. – 1990. – V.56 – P. 411–413.
1. POLISHCHUK, A. & TIMOFEEVA, T. (1993) “Metal-containing liquid-crystal phases”. Russian Chemical Reviews. Vol. 62. p. 291–321.
2. GRIDYAKINA, A., KLIMUSHEVA, G. & POLISHCHUK, A. (2005) “Physical properties of liquid crystals in lead decanoate systems”. Russian Journal of Physical Chemistry. Vol. 79. p. 71–75.
3. BORDYUG, A., KLIMUSHEVA G. & POLISHCHUK, A. (2005) “Structure and intermolecular interactions in ionic liquid crystals doped with electrochromic viologen”. Russian Journal of Physical Chemistry. Vol. 79. p. 66–70.
4. POLISHCHUK, I., GRINEVA, L. & POLISHCHUK, A. (1998) “Products of quaternization of 4,4'-Bipyridine with halogenated carboxylic acids. synthesis, structure, and photoreduction in the crystalline state”. Russian Journal of General Chemistry. Vol. 68 N. 4. p. 609–616.
5. BORDYUH, A., GARBOVSKIY, YU. & BUGAYCHUK, S. (2009) “Dynamic grating recording in lyotropic ionic smectics of metal alkanoates doped with electrochromic impurities”. Optical Materials. Vol. 31. p. 1109–1114.
6. GARBOVSKIY, YU., GRIDYAKINA, A. & KLIMUSHEVA, G. (2010) “Tunable optical and nonlinear optical response of smectic glasses based on cobalt alkanoates”. Liquid Crystals. Vol. 37. p. 1411 — 1418.
7. VOLKOV, S. & JACIMIRSKIJ, K. (1970) *Spectroscopy of molten salts*. Kiev: Naukova dumka.
8. CRABB, E., MOORE, E. & SMART, L. (2010) *Concepts in Transition Metal Chemistry*. London: Royal Society of Chemistry.
9. BORDYUH, A., GARBOVSKIY, YU. & S. BUGAYCHUK (2009) “Fast nonlinear optical mechanisms in Bi-Layered cells composed by lyotropic ionic liquid crystals with dye and viologen films”. Molecular Crystals and Liquid Crystals. Vol. 508. p. 296–308.
10. SAKAI, T., KAWABE, Y. & IKEDA, H. (1990) “Third order nonlinear optical properties of retinal derivatives”. Applied Physics Letters. Vol. 56. p. 411–413.

Надійшла до редколегії 04.03.18