

УДК 532.783

А.В. РИБАЛОЧКА

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДВОРІВНЕВИХ СПОСОБІВ ЗАПИСУ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ БІСТАБІЛЬНИХ ХОЛЕСТЕРИЧНИХ РКД

*Інститут фізики напівпровідників
ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ,
пр. Науки 45, м. Київ, 03028, Україна
E-mail: andriy.rybalochka@gmail.com*

Анотація. В даній роботі представлено аналіз трансформаційних переходів холестеричних рідких кристалів в бістабільних холестеричних рідкокристалічних дисплеях при застосуванні дворівневих динамічних способів запису інформації, а також наведено алгоритм експериментального дослідження, що дозволяє визначити для цих способів запису параметри електричних сигналів.

Аннотация. В данной работе представлен анализ трансформационных переходов холестерических жидких кристаллов в бистабильных холестерических жидкокристаллических дисплеях при применении двухуровневых динамических способов записи информации, а также приведено экспериментальное исследование, которое позволяет для этих способов записи определить параметры электрических сигналов.

Abstract. In this paper analysis of phase transitions of cholesteric liquid crystals in bistable cholesteric liquid crystal displays on application of 2+2 dynamic drive schemes has been shown. Also, the experimental investigation for determination of parameters of driving signals for 2+2 dynamic drive schemes has been presented.

Ключові слова: холестеричний рідкий кристал, холестерико-нематичний перехід, рідкокристалічні дисплеї, бістабільні дисплеї.

ВСТУП

В інформаційних дисплеях загального користування (цінники для товарів у супермаркетах, інформаційні табло та покажчики в місцях громадського користування) та персональних мобільних пристроях (електронні книги, пульти дистанційного керування, основні та допоміжні дисплеї на мобільних телефонах та т.і.) широко використовують бістабільні відбиваючі рідкокристалічні дисплеї, в яких статичне зображення зберігається без енергетичних витрат [1,2]. Дисплеї цього типу дозволяють суттєво збільшити час автономної роботи приладів, що їх використовують, та застосувати для електронного керування високоінформативними дисплеями технологічно прості методи пасивно-матричної адресації.

Характерною ознакою бістабільних холестеричних рідкокристалічних дисплеїв (ХРКД) є наявність двох стабільних станів рідкого кристалу в елементах зображення, один з яких характеризується селективним відбиванням світла від планарно-орієнтованої холестеричної структури, а другий – суттєвим розсіюванням світла конфокальною структурою [3]. Це дозволяє відмовитися від поляризаторів та світлофільтрів, що традиційно використовують в рідкокристалічних дисплеях інших типів, зменшує оптичні втрати та позитивно впливає на такі ергономічні характеристики дисплеїв, як яскравість, контраст зображення та кути огляду. Традиційні пасивно-матричні способи запису інформації дозволяють адресувати бістабільні ХРКД зі швидкістю порядку 10-20 мс на рядок [4]. Ці способи запису по структурі керуючих електричних сигналів подібні до способів запису, що використовуються для пасивно-матричної адресації TN- та STN-дисплеїв [5]. Розробка, так званих, динамічних способів запису інформації (ДСЗІ) для бістабільних ХРКД, в яких використаний швидкий релаксаційний перехід з гометропної до перехідної планарної холестеричної структури, дозволила значно підвищити швидкість запису інформації до величин порядку 1 мс на рядок [6-9]. В цих ДСЗІ застосовуються електронні схеми керування з використанням драйверів, здатних комутувати біполярні сигнали з багатьма рівнями напруги. Але найбільш прості методи керування бістабільними ХРКД базуються на дворівневих динамічних способах запису інформації, в яких електричні сигнали, що подають на рядки та стовпці

дисплею під час адресації, є послідовностями імпульсів напруги лише двох рівнів: U та нуль [10-13]. Це дозволяє використовувати в дисплеях інтегральні елементи з найпростішою архітектурою. Таким чином, застосування пасивно-матричної адресації у сукупності з дворівневими динамічними способами запису інформації забезпечує максимальну швидкість адресації та технологічну простоту виготовлення схем керування для бістабільних ХРКД.

В даній роботі представлено аналіз трансформаційних переходів холестеричних рідких кристалів (ХРК) в елементах зображення дисплея та їх експериментальне дослідження на тестовому зразку ХРКД. Наведено приклад побудови керуючих сигналів для дворівневих способів запису інформації та відповідний алгоритм розгортки, а також проаналізовані послідовності трансформаційних переходів ХРК в елементах зображення під час адресації. Вперше для дворівневих ДСЗІ наведено вимоги для ефективних рівнів напруги в різних стадіях адресації через значення критичних та порогових напруг електрооптичних характеристик ХРКД. Визначено експериментальне дослідження ХРК-матеріалу на тестовому зразку ХРКД для швидкого отримання параметрів електричних сигналів для дворівневих ДСЗІ.

ТРАНСФОРМАЦІЙНІ ПЕРЕХОДИ ХОЛЕСТЕРИЧНИХ РІДКИХ КРИСТАЛІВ

Схематичне представлення можливих трансформаційних переходів між різними станами холестеричного рідкого кристалу в дисплеї наведено на рис.1. Стабільними станами рідкого кристалу, тобто станами, які за допомогою методів поверхневої чи об'ємної стабілізації можуть залишатися незмінними досить довгий проміжок часу (до року та більше) є планарний (I) та конфокальний (K) стани. В планарному стані осі холестеричних спіралей мають напрям переважної орієнтації, що співпадає з перпендикуляром до поверхні підкладок дисплею. Світло, що падає на ХРК у цьому стані, селективно відбивається від його періодичної структури. Таким чином, елементи зображення дисплею з ХРК у планарному стані (ON -стан), мають забарвлення, що відповідає спектру селективного відбивання світла від такої структури. В конфокальному стані вісі холестеричних спіралей спрямовані переважно вздовж поверхні підкладок дисплею. В цьому випадку зовнішнє світло частково розсіюється та частково проходить крізь конфокальну структуру ХРК, де потім поглинається адсорбуючим шаром, який зазвичай наносять на зворотну підкладку дисплею. Тому елементи зображення дисплею з ХРК у конфокальному стані сприймаються як темні (OFF -стан).

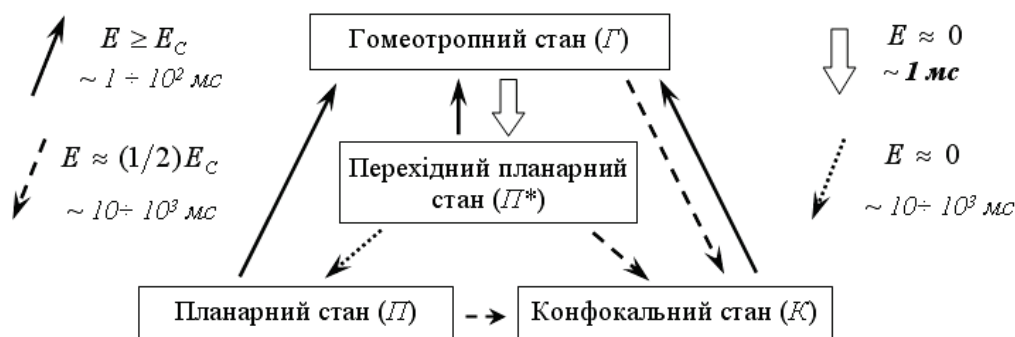


Рис.1. Схематичне представлення трансформаційних переходів ХРК в дисплеї

Для перезапису інформації на бістабільному ХРКД необхідно здійснити у елементах зображення трансформаційні переходи між планарним та конфокальним станами. Але безпосередньо можна здійснити лише перехід з планарного до конфокального стану. Зворотній перехід можливий лише через, так звані, гомеотропний (I) та перехідний планарний стани (II^*). Якщо до ХРК у тестовій комірці перпендикулярно до підкладок прикласти електричне поле більше за критичне значення E_C [1,3], то здійсниться перехід до гомеотропного стану. Гомеотропний стан ХРК – такий стан, в якому немає характерної спіральної структури в просторовому розташуванні молекул, а всі вони спрямовані вздовж прикладеного зовнішнього електричного поля. За своїми структурними та оптичними властивостями ХРК-матеріали у гомеотропному стані є подібними до нематичних рідких кристалів. Саме тому й перехід до гомеотропного стану називають холестерико-нематичним переходом. Гомеотропний стан не є стабільним. Тому при зменшенні електричного поля до значень менших за критичне починаються релаксаційні процеси. Кінцевий стабільний стан ХРК-матеріалу залежить від способу вимкнення поля. Якщо воно вимикається відносно повільно, то ХРК з гомеотропного стану переходить безпосередньо до стабільного конфокального стану, а якщо швидко й практично відразу до нуля – до стабільного планарного стану. Детальне вивчення процесу трансформаційного переходу з гомеотропного до планарного стану показало, що він здійснюється через

проміжний, так званий, перехідний планарний стан. Цей стан характеризується наявністю холестеричної структури у розташуванні молекул подібної до планарного стану, але з в 2-3 рази більшим кроком холестеричної спіралі [3]. Суттєво, що тривалість цього переходу на один-три порядки менша за тривалість усіх інших релаксаційних переходів у ХРК та для різних матеріалів складає величину від сотень мікросекунд до одиниць мілісекунд. Перехідний планарний стан є нестабільним, та з нього можна отримати як планарний, так й конфокальний кінцеві стани. На рис.1 суцільними стрілками зображені індуковані полем холестерико-нематичні переходи, пунктирними – релаксаційні переходи під дією електричного поля, а крапковою та фігурною стрілками – релаксаційні переходи за умови відсутності електричного поля. Поряд зі стрілками вказані приблизні значення напруженості електричного поля відносно її критичного значення для холестерико-нематичного переходу (E_C), при яких відбуваються відповідні переходи та їх тривалості. При значеннях електричного поля більше за критичне ХРК переходить до гомеотропного стану незалежно від того, в якому стані він знаходився раніше. Швидкий перехід до перехідного планарного стану можливий лише з гомеотропного стану за умови відсутності зовнішнього електричного поля. Планарний стан також може бути отриманий лише після холестерико-нематичного переходу з гомеотропного через перехідний планарний стан. Конфокальний стан можна отримати як з планарного, так й з гомеотропного та перехідного планарного станів при наявності зовнішнього електричного поля з величиною меншою за критичну.

Більш детальну інформацію про описані вище трансформаційні переходи ХРК та можливості їх використання при динамічній адресації бістабільних дисплеїв дає експериментальне дослідження електрооптичних характеристик зразка ХРКД, що буде представлено нижче.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРООПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БІСТАБІЛЬНИХ ХРКД

Для експериментального дослідження електрооптичних характеристик бістабільних ХРКД на тестовий зразок подають послідовність електричних сигналів, що представлена на рис.2. Частота сигналів є порядку 1 кГц. Ця послідовність поділяється на три стадії: «Початковий стан», «Дія» та «Релаксація».

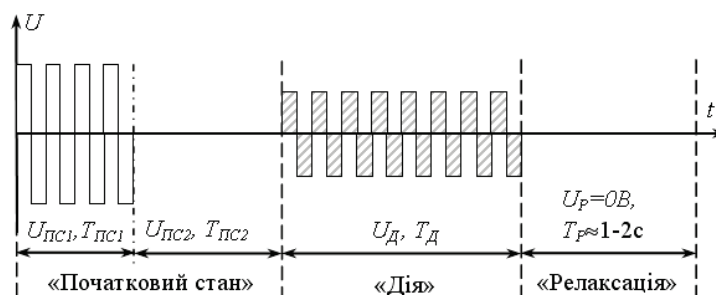


Рис.2. Форма електричних сигналів для дослідження електрооптичних характеристик бістабільних ХРКД

В стадії «Початковий стан» відбувається встановлення початкового стану ХРК, для якого досліджується вольт-яскравісна характеристика. В стадії «Дія» на зразок подають електричний сигнал з ефективним значенням напруги, яке з заданим кроком змінюється для кожного наступного вимірювання. Якщо в стадії «Дія» на зразок подають електричний сигнал з фіксованим часом дії (T_D) та ефективним значенням напруги, яке з заданим кроком змінюється для кожного наступного вимірювання, то ми отримуємо вольт-яскравісну характеристику ХРК, а якщо на зразок подають електричний сигнал з фіксованим значенням ефективної напруги (U_D) та часом дії, який з заданим кроком змінюється для кожного наступного вимірювання, то ми, відповідно отримуємо час-яскравісну характеристику. Стадія «Релаксація» необхідна для того, щоб ХРК перейшов до стабільного стану після закінчення стадії «Дія». Значення інтенсивності відбитого світла вимірюється в кінці стадії «Релаксація». Якщо, наприклад, за час T_{PC1} напруга U_{PC1} переводить ХРК до гомеотропного стану, то у випадку коли $T_{PC2}=0$ – початковим є гомеотропний стан, коли $T_{PC2}=T_{Г-П*}$ ($T_{Г-П*}$ – час переходу з гомеотропного до перехідного планарного стану) – перехідний планарний стан, а коли $T_{PC2} \approx 1-2\text{с}$ – стабільний планарний стан ХРК (для багатьох ХРК-матеріалів, що використовуються у ХРКД цього часу достатньо для повного завершення всіх релаксаційних процесів). Якщо, наприклад, рівень напруги U_{PC1} переводить ХРК у конфокальний стан за час T_{PC1} , то після $T_{PC2} \approx 1-2\text{с}$ ХРК буде знаходитися у стабільному конфокальному стані. Після закінчення дії напруги U_D остаточне вимірювання яскравості стану ХРК в тестовій комірці чи елементі зображення дисплею відбувається через час $T_P \approx 1-2\text{с}$. Змінюючи з деяким кроком рівень напруги U_D , при

фіксованому значенні параметру T_D , ми отримуємо електрооптичну вольт-яскравісну характеристику ХРКД, що демонструє залежність яскравості його кінцевого стабільного стану від значення напруги U_D . Можна також фіксувати значення напруги U_D та вимірювати електрооптичну залежність яскравості зображення від тривалості T_D дії цієї напруги. Зауважимо, що для визначення часу переходу ХРК-матеріалу з гомеотропного до перехідного планарного стану можна використати один з наступних методів: метод вимірювання спектрів відбивання від холестеричної текстури з часовим інтервалом меншим за одну мілісекунду [3], методом вимірювання зміни ємності ХРК-комірки безпосередньо під час цього переходу [14], чи метод дослідження спеціальних електрооптичних характеристик, що використовується для оптимізації параметрів електричних сигналів для першого відомого дворівневого ДСЗІ [15].

Розглянемо приклади вольт-яскравісних характеристик ХРКД, що відповідають чотирьом різним початковим станам ХРК: конфокальному, гомеотропному, планарному та перехідному планарному. Вони були досліджені за допомогою вимірювально-обчислювального комплексу SV-100, який розроблений в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України [16]. Дослідження були проведені для цілого ряду ХРК-матеріалів. Наведені нижче характеристики безпосередньо отримані на тестовій комірці товщиною 4,4 мкм, що була заповнена холестеричним рідкокристалічним матеріалом ХН-1 [17]. Зауважимо, що критичними в даному дослідженні визначені значення напруг, при яких відбувається холестерико-нематичний перехід, а інші рівні напруги, при яких електрооптичні характеристики демонструють явну зміну характеру своєї поведінки, визначені як пороги.

Дві вольт-яскравісні характеристики для початкового конфокального стану ХРК ($R_K(U)$) з різними значеннями тривалості стадії «Дія» ($T_D^1=10\text{с}$ та $T_D^2=0,1\text{с}$) наведено на рис.3. При зростанні напруги U_D від 0 до значення U_{K-K} кінцевим станом ХРК залишається конфокальний. Тобто напруга U_{K-K} може бути визначена, як порогова напруга при якій початковий конфокальний стан адресується у кінцевий конфокальний стан з мінімальною величиною значення відбивання зовнішнього світла (R). При подальшому зростанні напруги U_D відбувається поступове збільшення значення R до максимального, яке спостерігається при досягненні значення U_K^C . Це означає, що напруги U_K^C достатньо для переведу ХРК у гомеотропний стан за час T_D , а потім за час T_P він переходить до стабільного планарного стану. Тобто U_K^C – це критична напруга холестерико-нематичного переходу, при якій відбувається перехід ХРК з початкового конфокального стану до гомеотропного. Також це дослідження показало, що зі зменшенням часу T_D значення напруг U_{K-K} та U_K^C зростають.

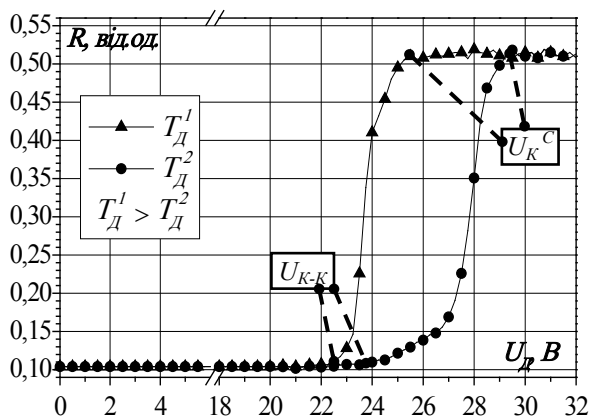


Рис.3. Вольт-яскравісні характеристики ХРКД: початковий конфокальний стан

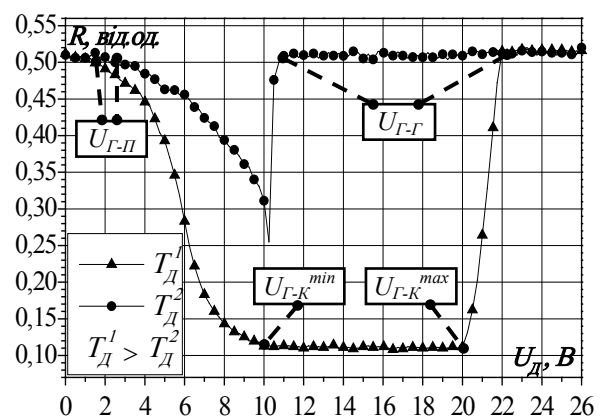


Рис.4. Вольт-яскравісні характеристики ХРКД: початковий гомеотропний стан

Дві вольт-яскравісні характеристики ХРКД для початкового гомеотропного стану ХРК ($R_H(U)$) наведено на рис.4 ($T_D^1=10\text{с}$ та $T_D^2=0,1\text{с}$). Для значень напруги U_D від 0 до $U_{Г-П}$ кінцевим станом ХРК є планарний. Це означає, що напруга $U_{Г-П}$ – порогова напруга, наявність якої не заважає ХРК-матеріалу переходити з гомеотропного до планарного стану з максимальним значенням R . При подальшому збільшенні значення напруги U_D до величини $U_{Г-К}^{min}$ відбувається поступове зменшення значення R до мінімального. Тобто $U_{Г-К}^{min}$ – мінімальна порогова напруга, при якій ХРК переходить з початкового гомеотропного стану до конфокального з мінімальним значенням R . До значення $U_{Г-К}^{max}$ зростання напруги U_D не призводить до змін оптичних властивостей кінцевого стану ХРК. Тобто $U_{Г-К}^{max}$ – максимальна порогова напруга, яка початковий гомеотропний стан ХРК переводить в кінцевий конфокальний стан з мінімальним значенням R . Потім спостерігається зростання значення R з ростом U_D

до величини $U_{Г-Г}$. Її можна визначити, як мінімальну порогову напругу, що утримує гомеотропний стан ХРК протягом часу T_D . В даному випадку поведінка порогових напруг як функцій від проміжку часу T_D носить різний характер. При зростанні T_D значення напруги $U_{Г-П}$ зменшується, а $U_{Г-Г}$ – збільшується. Така поведінка напруги $U_{Г-П}$ означає, що при збільшенні часу T_D , значення напруги U_D , яке не буде заважати переходу ХРК з гомеотропного до планарного стану, зменшується. А поведінка напруги $U_{Г-Г}$ вказує на те, що для утримання гомеотропного стану ХРК протягом більшого проміжку часу T_D необхідне й більше значення напруги U_D . Характер поведінки рівнів напруг $U_{Г-К}^{min}$ та $U_{Г-К}^{max}$ має більш складний характер, бо, як видно з рис.4, для T_D^2 взагалі не існує станів ХРК з мінімальними значеннями R . Проведені дослідження показали, що для існуючих значень напруга $U_{Г-К}^{min}$ є практично незмінною, а $U_{Г-К}^{max}$ зменшується зі збільшенням часу T_D .

Дві вольт-яскравісні електрооптичні характеристики ХРКД для початкового планарного стану ХРК ($R_{П}(U)$) наведено на рис.5 ($T_D^1=10с$ та $T_D^2=0,1с$). При збільшенні напруги U_D від 0 до $U_{П-П}$ кінцевий стан ХРК – планарний. Тобто порогову напругу $U_{П-П}$ можна визначити, як таку, величини якої ще недостатньо для руйнування початкового планарного стану ХРК з максимальним значенням R . При подальшому збільшенні напруги U_D відбувається поступове зменшення яскравості кінцевого стану ХРК й при досягненні значення $U_{П-К}^{min}$ відбувається остаточний перехід ХРК в конфокальний стан. Тобто напруга $U_{П-К}^{min}$ – мінімальна порогова напруга, що переводить ХРК з початкового планарного стану до конфокального стану з мінімальним значенням R . При подальшому збільшенні напруги U_D до значення $U_{П-К}^{max}$ не відбувається змін у кінцевому стані ХРК. Таким чином, напруга $U_{П-К}^{max}$ – максимальна порогова напруга, що переводить ХРК з початкового планарного стану до конфокального стану з мінімальним значенням R . Подальше зростання напруги U_D призводить до поступового збільшення R . При досягненні величини $U_{П}^C$ ми знов отримуємо кінцевий планарний стан ХРК з максимальним значенням R . Це означає, що напруги $U_{П}^C$ достатньо для того, щоб за час T_D реалізувати холестерико-нематичний перехід ХРК, а після закінчення її дії відбувається перехід з гомеотропного до стабільного планарного стану. Тобто $U_{П}^C$ – це критична напруга холестерико-нематичного переходу ХРК з початкового планарного стану. Також це дослідження показало, що в даному випадку при зростанні часу T_D значення порогових та критичних напруг різною мірою, але лише зменшуються.

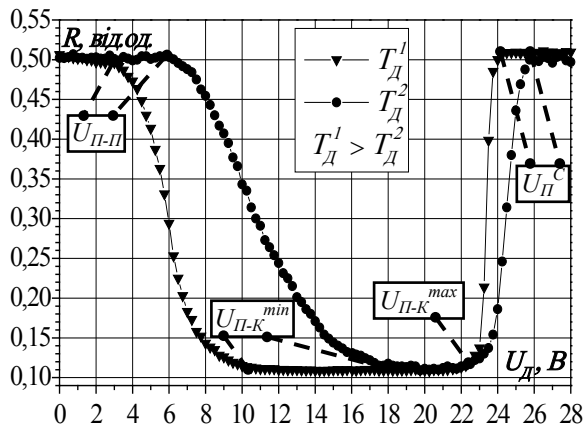


Рис.5. Вольт-яскравісні характеристики ХРКД: початковий планарний стан

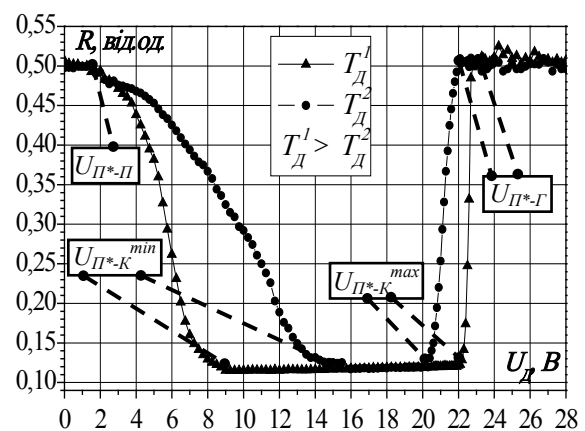


Рис.6. Вольт-яскравісні характеристики ХРКД: початковий перехідний планарний стан

Дві вольт-яскравісні електрооптичні характеристики ХРКД для початкового перехідного планарного стану ХРК ($R_{П*}(U)$) наведено на рис.6 ($T_D^1=10с$ та $T_D^2=0,1с$). Визначення та поведінка порогових напруг у даному випадку є подібними до випадку, коли було розглянуто характеристики для початкового гомеотропного стану. Напругу $U_{П*П}$ можна визначити, як порогову напругу, що ще дозволяє ХРК переходити з перехідного планарного до планарного стану з максимальним значенням R . Напруги $U_{П*К}^{min}$ та $U_{П*К}^{max}$ є, відповідно, мінімальною та максимальною пороговими напругами, що переводять ХРК з початкового перехідного планарного стану до конфокального стану з мінімальним значенням R . А напруга $U_{П*Г}$ – мінімальна порогова напругу, що здатна перевести ХРК з перехідного планарного до гомеотропного стану за час T_D , з якого потім він переходить до стабільного планарного стану з максимальним значенням R . Було визначено, що дві більші з цих чотирьох порогових напруг $U_{П*К}^{max}$ та $U_{П*Г}$ при зростанні часу T_D зменшуються, а дві менші $U_{П*П}$ та $U_{П*К}^{min}$ – збільшуються.

Тепер проаналізуємо співвідношення між всіма чотирнадцятьма критичними та пороговими

напругами, що були визначені вище: $U_{K-K}, U_K^C, U_{Г-П}, U_{Г-К}^{min}, U_{Г-К}^{max}, U_{Г-Г}, U_{П-П}, U_{П-К}^{min}, U_{П-К}^{max}, U_{П}^C, U_{П*П}, U_{П*К}^{min}, U_{П*К}^{max}$ та $U_{П*Г}$. Для встановлення співвідношень між ними був проведений загальний аналіз відповідних трансформаційних переходів ХРК та розгляд вольт-яскравісних характеристик по групах, що отримані при різних фіксованих значеннях часу дії T_d для чотирьох початкових станів ХРК: конфокального, гомеотропного, планарного та перехідного планарного. Приклад однієї такої групи характеристик для $T_d=3\text{с}$ наведено на рис.7. Крім того аналіз подібних груп характеристик для різних значень часу дії T_d показав, що при досягненні T_d величини порядку 10 секунд порогові та критичні значення напруг вже не змінюються з подальшим його збільшенням. Такі їх значення визначають як «статичні». Також групи характеристик подібні до представлених на рис.7 дозволяють визначити залежність від параметру T_d величини, так званого, «діапазону бістабільності». «Діапазон бістабільності» визначається як діапазон напруг, які протягом однакового проміжку часу T_d здатні утримати гомеотропний стан ХРК у ХРК-комірці, й при цьому переводять перехідний планарний, планарний та конфокальний стани ХРК до кінцевого конфокального стану з мінімальним значенням R (див. рис.7).

Безпосередньо через значення порогових напруг для кожного значення часу дії T_d він визначається наступним чином:

$$\text{Max}[U_{Г-Г}(T_d); U_{П*К}^{min}(T_d)] \leq U \leq U_{П*К}^{max}(T_d) \quad (1)$$

Зауважимо, що співвідношення між різними критичними та пороговими напругами, що представлені вище, мають узагальнюючий характер. Для інших матеріалів вони відрізнялися лише кількісними значеннями. Саме такі особливості ХРК-матеріалів, як бістабільність, широкий спектр трансформаційних переходів між різними станами та їх гістерезисні властивості дали можливість використовувати цей тип рідких кристалів для створення відбиваючих високоінформативних дисплеїв з власною пам'яттю.

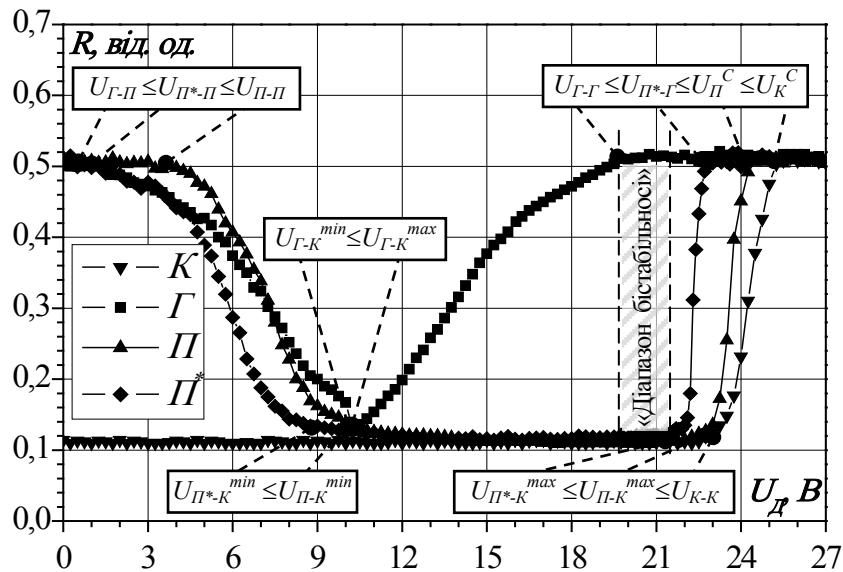


Рис.7. Група вольт-яскравісних характеристик для чотирьох різних початкових станів ХРК в дисплеї при $T_d=3\text{сек}$

Далі розглянемо принципи побудови керуючих сигналів для дворівневих динамічних способів запису інформації та через величини критичних та порогових напруг сформуємо для них вимоги на рівні напруг в різних стадіях адресації.

ІДЕОЛОГІЯ ДВОРІВНЕВОЇ ДИНАМІЧНОЇ АДРЕСАЦІЇ ХРКД

Головною особливістю дворівневих ДСЗІ є простота електричних сигналів, що подають при адресації ХРКД на рядки та стовпці дисплею. На рис. 8 наведено приклад стандартної побудови електричних сигналів, що подають на рядки (R) та стовпці (C) дисплею, а також результуючі на елементах зображення (P) для дворівневого ДСЗІ " $U/\sqrt{3}/2$ " [11,18].

Схематичне зображення послідовності ефективних значень напруги на елементах зображення з n -ного рядка дисплею, що містить N рядків, при адресації дисплею за допомогою дворівневих динамічних способів запису представлено на рис. 9. Її можна розділити на наступні стадії: підготовчу

стадію (U_{nd} – ефективне значення напруги, T_{nd} – тривалість), першу утримуючу (U_{ym}^1, T_{ym}^1), стадію вибору ($U_{\text{вб}} = U_{ON}$ чи $U_{OFF}, T_{\text{вб}}$), другу утримуючу стадію (U_{ym}^2, T_{ym}^2) та еволюційну стадію (U_{ee}, T_{ee}). Під час підготовчої стадії ХРК у елементах зображення переводять до гомеотропного стану. Зауважимо, що в назві дворівневих ДСЗІ зазвичай використовують значення «характеристичного відношення», що визначається відношенням між ефективними значеннями напруг на елементах зображення під час підготовчої та утримуючої стадій запису. Наприклад для ДСЗІ « $U/\sqrt{3/2}$ » «характеристичне відношення»: $U_{nd}/U_{ym} = \sqrt{3/2}$. Значення цього відношення для дворівневих ДСЗІ може мати певні дискретні значення [18]. Але важливо, що незалежно від його величини для всіх дворівневих динамічних способів запису трансформаційні процеси реалізуються аналогічним чином. Послідовності переходів між станами ХРК для вибраних (записуються в кінцевий планарний стан) та невибраних (записуються в кінцевий конфокальний стан) елементів зображення для дворівневих динамічних способів запису представлені на рис.10, а алгоритм розгортки для них наведено на рис.11.

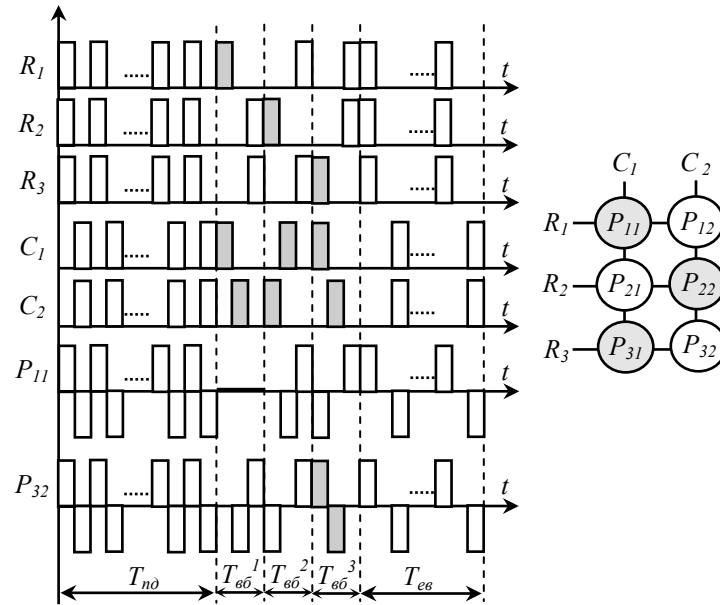


Рис.8. Приклад стандартної побудови електричних сигналів для дворівневих ДСЗІ

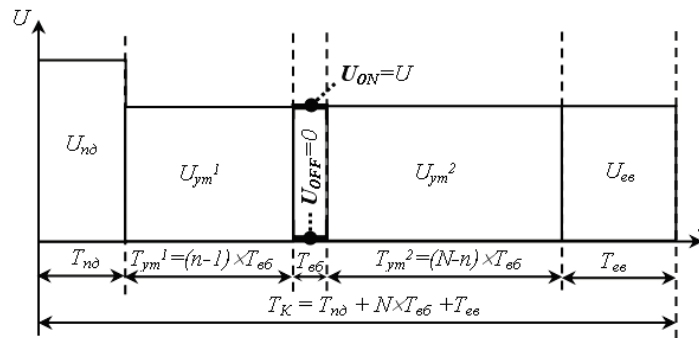


Рис.9. Послідовність ефективних значень напруги на елементах зображення

Час дії керуючих сигналів							
Що записуємо	Стан ХРК до початку адресації	Підготовча стадія	Перша утримуюча стадія	Стадія вибору	Друга утримуюча стадія	Еволюційна стадія	Кінцевий стан ХРК
Π	Π чи K	Γ	Γ	Γ (U_{ON})	Γ	Γ	Π
K	Π чи K	Γ	Γ	Π^* (U_{OFF})	K	K	K

Рис.10. Послідовність трансформаційних переходів ХРК при адресації дисплею

В підготовчій стадії ХРК матеріал під дією напруги U_{n0} за час T_{n0} в усіх елементах зображення дисплею переходить до гомеотропного стану. Під час першої утримуючої стадії гомеотропний стан ХРК утримується за допомогою напруги U_{ym}^1 . У стадії вибору, рівень напруги $U_{OFF}=0$ дозволяє ХРК перейти за час $T_{\text{вб}} \approx T_{\Gamma\text{-П}^*}$ з гомеотропного до перехідного планарного стану, а рівень напруги $U_{ON}=U_{ym}$ утримує гомеотропний стан ХРК. Під час другої утримуючої та еволюційної стадій гомеотропний стан ХРК зберігається у тих елементах зображення, в яких його було утримано протягом попередніх стадій. В тих елементах зображення, де ХРК за час стадії вибору перейшов до перехідного планарного стану починається перехід до конфокального стану. Після закінчення еволюційної стадії в тих елементах зображення, де ХРК було утримано протягом адресації в гомеотропному стані, відбувається перехід з гомеотропного до планарного стану, а в усіх інших – формується стабільний конфокальний стан ХРК.

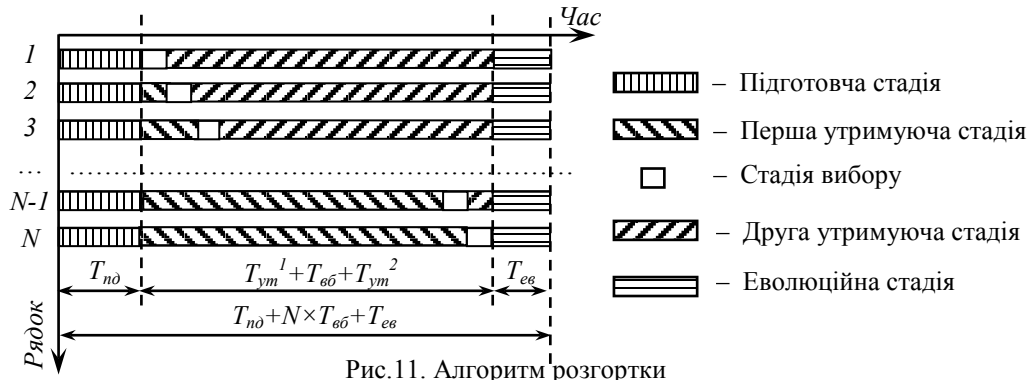


Рис.11. Алгоритм розгортки

Загальний час запису кадру для ХРКД, що складається з N рядків, становить: $T_K = T_{n0} + N \times T_{\text{вб}} + T_{\text{ев}}$. При великій кількості рядків (порядку $N \approx 1000$) середня тривалість запису одного буде складати величину $T_K/N \approx T_{\text{вб}} \approx T_{\Gamma\text{-П}^*}$, тобто порядку тривалості переходу з гомеотропного до перехідного планарного стану для ХРК-матеріалу, що використовується у дисплеї.

ВИМОГИ НА ЕФЕКТИВНІ РІВНІ НАПРУГИ В РІЗНИХ СТАДІЯХ АДРЕСАЦІЇ

Виходячи з проведених експериментальних досліджень та аналізу трансформаційних переходів ХРК в дисплеї, для дворівневих способів запису можна сформулювати вимоги на ефективні рівні напруги в різних стадіях адресації. Але спочатку зауважимо, що для дворівневих способів запису, навіть для тих елементів зображення, що адресуються в один і той самий кінцевий стан, але розташовані в різних рядках дисплею, тривалості першої та другої утримуючих стадій адресації відрізняються. При цьому, так звані, «граничні» умови адресації реалізуються для елементів зображення з першого та останнього рядків. Це означає, що якщо керуючі сигнали з певними параметрами задовольняють умовам адресації для елементів зображення з першого та останнього рядків дисплею, то умови для всіх інших рядків будуть виконані автоматично.

Ефективна напруга U_{n0} в підготовчій стадії повинна переводити ХРК з планарного чи конфокального стану до гомеотропного за час T_{n0} , тобто бути не менш за рівень напруги $U_K^C(T_D)$ при $T_D = T_{n0}$. Ефективний рівень напруги для першої та другою утримуючих стадій, та еволюційної стадії однаковий: $U_{ym} = U_{\text{ев}} = U_{n0} / \langle \text{«характеристичне відношення»} \rangle$ (для ДСЗІ “ $U / \sqrt{3/2}$ ” – $U_{ym} = U_{\text{ев}} = U_{n0} / \sqrt{3/2}$). Його повинно бути достатньо для утримання гомеотропного стану ХРК у всіх вибраних елементах зображення до закінчення еволюційної стадії. Цей час: $T = N \times T_{\text{вб}} + T_{\text{ев}} \approx T_K - T_{n0} \approx T_K$. Це означає, що рівень напруги U_{ym} повинен задовольняти умові: $U_{ym} \geq U_{\Gamma\text{-I}}(T_D)$ при $T_D = T_K$. Також рівень напруги U_{ym} повинен адресувати ХРК у конфокальний стан у невибраних елементах зображення. Це означає, що він повинен бути в межах наступних діапазонів: $U_{\text{П}^*\text{-K}}^{\min}(T_K) \leq U_{ym} \leq U_{\text{П}^*\text{-K}}^{\max}(T_K)$ – як умова для елементів зображення з першого, та $U_{\text{П}^*\text{-K}}^{\min}(T_{\text{ев}}) \leq U_{ym} \leq U_{\text{П}^*\text{-K}}^{\max}(T_{\text{ев}})$ – як умова для елементів зображення з останнього рядків дисплею. Особливості поведінки напруг $U_{\text{П}^*\text{-K}}^{\min}(T_D)$ та $U_{\text{П}^*\text{-K}}^{\max}(T_D)$ є такими, що спільним діапазоном можливих значень для U_{ym} для обох випадків є діапазон, що визначається для меншого значення параметру T_D , тобто в даному випадку для останнього рядка: $T_D = T_{\text{ев}}$. Таким чином, необхідною умовою для здійснення адресації бістабільних ХРКД за допомогою дворівневих динамічних способів запису інформації є наявність спільної області в перетині двох діапазонів напруги для U_{ym} : $U_{ym} \geq U_{\Gamma\text{-I}}(T_K)$ та $U_{\text{П}^*\text{-K}}^{\min}(T_{\text{ев}}) \leq U_{ym} \leq U_{\text{П}^*\text{-K}}^{\max}(T_{\text{ев}})$. Ця умова може бути визначена як критерій можливості застосування дворівневих ДСЗІ для бістабільних ХРКД. Для мінімізації амплітудного значення напруги в керуючих електричних сигналах необхідно вибрати мінімальне значення з можливих для напруги U_{ym} .

Оптимальною з цієї точки зору є ситуація, коли виконується умова: $U_{Г-Г}(T_K) = U_{П*К}^{min}(T_{ee})$. Це пояснюється тим, що зменшити $U_{Г-Г}(T_K)$ ми не можемо, а подальше зменшення $U_{П*К}^{min}(T_{ee})$ за рахунок збільшення T_{ee} не дасть можливості отримати менше значення напруги U_{ym} .

У стадії вибору для невибраних елементів зображення напруга $U_{OFF} = 0$ має завжди нульове значення. Це означає, що вона взагалі не накладає ніяких додаткових умов на рівні напруги в електричних сигналах керування. Аналогічна ситуація й з рівнем напруги $U_{ON} = U_{ym}$. Цей рівень має бути достатнім для утримання гомеотропного стану ХРК у вибраних пікселях протягом часу $T_{об}$. Ця умова виконується автоматично завдяки тому, що виконання умови $U_{ym} \geq U_{Г-Г}(T_K)$ автоматично задовольняє умову $U_{ym} > U_{Г-Г}(T_D)$, коли $T_D < T_K$. В силу того, що саме в стадії вибору відбувається визначення кінцевого стану ХРК в елементах зображення дисплея, то автоматичне виконання умов адресації рівнями напруги U_{ON} та U_{OFF} можна вважати ще одною перевагою дворівневих ДСЗІ в порівнянні з іншими динамічними способами запису інформації.

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

Спираючись на приведені вище результати експериментального дослідження, аналіз послідовності трансформаційних переходів ХРК-матеріалу в елементах зображення дисплею під час адресації та вимоги на ефективні рівні напруги в різних стадіях адресації можна сформулювати алгоритм визначення параметрів керуючих електричних сигналів для дворівневих динамічних способів запису інформації для бістабільних ХРКД. Він полягає в проведенні наступної послідовності досліджень параметрів та електрооптичних характеристик ХРК-матеріалу в тестовому зразку:

1) Визначити час переходу з гомеотропного до перехідного планарного стану ($T_{Г-П*}$) одним з відомих методів [3,14,15] та задати кількість рядків у дисплеї (N), для якого будуть визначатися параметри електричних сигналів. Таким чином будуть визначені тривалість стадії вибору $T_{об} \approx T_{Г-П*}$ та сумарна тривалість утримуючої стадії та стадії вибору, яку для високоінформативних бістабільних ХРКД можна вважати приблизно рівною часу кадру $T_K \approx N \times T_{об}$;

2) Дослідити вольт-яскравісну характеристику з початкового гомеотропного стану ХРК при $T_D = T_K$. З неї визначаємо величину напруги $U_{Г-Г}(T_K)$, яка в свою чергу визначає мінімальне можливе значення для напруги U_{ym} ;

3) Дослідити час-яскравісну електрооптичну характеристику подібну до вольт-яскравісної з початкового перехідного планарного стану ХРК-матеріалу, але в якій змінним параметром є не значення напруги U_D , а тривалість стадії «Дія» T_D (див. рис.2). Значення U_D є фіксованим і дорівнює визначеному у пункті (2) значенню ефективної напруги для утримуючої стадії: $U_D = U_{ym} = 3$ цієї характеристики визначаємо мінімальну тривалість еволюційної стадії T_{ee} .

4) Дослідити час-яскравісну електрооптичну характеристику подібну до вольт-яскравісної з початкового конфокального стану, але в якій змінним параметром є не значення напруги U_D , а тривалість стадії «Дія» T_D . Значення U_D є фіксованим і дорівнює ефективному значенню напруги для підготовчої стадії, тобто дорівнює визначеному у пункті (2) значенню ефективної напруги для утримуючої стадії помноженому на значення «характеристичне відношення» обраного для дворівневого способу запису: $U_D = U_{но} = U_{Г-Г}(T_K) \times \text{«характеристичне відношення»}$. З цієї характеристики визначаємо мінімальну тривалість еволюційної стадії $T_{но}$.

Виконавши таку послідовність досліджень ми отримаємо всі необхідні параметри керуючих сигналів для дворівневого ДСЗІ з обраним значення «характеристичного відношення» (параметри наведені в послідовності їх отримання при виконанні вищенаведеного алгоритму): $T_{об}$, N , U , T_{ee} та $T_{но}$. Часові параметри отримані безпосередньо, а значення напруги U , визначається через значення напруги для утримуючої стадії визначеної у пункті (2) та обраного значення «характеристичного відношення»: $U = U_{но} = U_{ym} \times \text{«характеристичне відношення»}$.

ВИСНОВКИ

В роботі приведено аналіз трансформаційних переходів холестеричних рідких кристалів в елементах зображення бістабільних холестеричних рідкокристалічних дисплеїв та їх експериментальне дослідження на тестовому зразку. Проаналізована поведінка порогових та критичних значень напруги для вольт-яскравісних електрооптичних характеристик для початкових гомеотропного, планарного, перехідного планарного та конфокального станів ХРК-матеріалів. Розглянуто приклад стандартної побудови електричних сигналів для рядків та стовпців дисплею, а також результуючих на елементах зображення для дворівневих ДСЗІ. Також проаналізовані послідовності ефективних значень напруги та послідовності трансформаційних переходів між станами ХРК-матеріалу для вибраних та невибраних елементів зображення під час адресації. На підставі цього аналізу сформульовано вимоги на рівні напруги впродовж різних стадій адресації. Як підсумок проведеного дослідження, сформульовані

критерій можливості застосування методів дворівневої динамічної адресації, а також алгоритм проведення експериментального дослідження, яке дозволяє визначити параметри керуючих сигналів для дворівневих ДСЗІ з мінімальним амплітудним значенням напруги.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wu S.-W. Reflective liquid crystal displays / S.-W. Wu, D.-K. Yang – New York. – John Wile & Sons. (Wiley series in display technology), 2001. – 335 p.
2. Dozov I. Bistable Liquid Crystal Technologies / I. Dozov // SID 2003 Digest – 2003. – P. 946–949.
3. Yang D.-K. Switching mechanism of bistable reflective cholesteric displays / D.-K. Yang, Z.-J. Lu // SID'95 Digest – 1995. – P. 351–354.
4. Yang D.K. Cholesteric reflective display: drive scheme and contrast / D.K. Yang, J.W. Doane, Z. Yaniv, J. Glasser // J. Appl. Phys. Lett. – 1994. – Vol.64, №15 – P. 1905–1907.
5. Alt P. Scanning limitations of liquid-crystal displays / P. Alt, P. Pleshko // IEEE Transactions of Electron Devices – 1974. – Vol. ED-21, №2 – P. 146–155.
6. Huang X.-Y. Dynamic drive for bistable reflective cholesteric displays: a rapid addressing scheme / X.-Y. Huang, D.-K. Yang, P.J. Bos, J.W. Doane // SID'95 Digest – 1995. – P. 347–350.
7. Huang X.-Y. High-performance dynamic drive scheme for bistable reflective cholesteric displays / X.-Y. Huang, M. Stefanov, D.-K. Yang, J.W. Doane // SID'96 Digest – 1996. – P. 359–362.
8. Zhu Y.-M. High-speed dynamic drive scheme for bistable reflective cholesteric displays / Y.-M. Zhu, D.-K. Yang // SID'97 Digest – 1997. – P. 97–100.
9. Rybalochka A. Dynamic drive scheme for fast addressing of cholesteric displays / A. Rybalochka, V. Sorokin, S. Valyukh, A. Sorokin // SID'00 Digest – 2000. – P. 818–821.
10. Kozachenko A. Control of reflectivity utilizing hysteresis properties in reflective cholesteric displays / A. Kozachenko, V. Sorokin, P. Oleksenko // Proc. of ADT '97 – 1997. – P. 35–39.
11. Rybalochka A. Simple drive scheme for bistable cholesteric LCDs / A. Rybalochka, V. Sorokin, S. Valyukh, A. Sorokin // SID'01 Digest – 2001. – P. 882–885.
12. Rybalochka A. Addressing of cholesteric LCD by two-level dynamic drive scheme / A. Rybalochka, V. Sorokin, S. Valyukh, A. Sorokin // Proc. of the 11th Int. Symp. “Advanced display technologies” – 2002. – P. 70–76.
13. Сорокин В. М. Малогабаритные высокоинформативные холестерические дисплеи с памятью / В. М. Сорокин, Р. Я. Зелинский, А. В. Рыбалочка // Технология и конструирование в электронной аппаратуре – 2008. – №2(74) – С. 3–9.
14. Huang X.-Y. Transient dielectric study of bistable reflective cholesteric displays and design of rapid drive scheme / X.-Y. Huang, D.-K. Yang, J.W. Doane // J. Appl. Phys. Lett. – 1995. – Vol.67, №9 – P. 1211–1213.
15. Rybalochka A. Optimization of driving signal parameters for cholesteric LCD that addressed by $U/\sqrt{2}$ driving ideology / A. Rybalochka, V. Sorokin, S. Valyukh // Proc. of the 7th Int. Symp. “Advanced display technologies” – 1998. – P. 122–124.
16. Сорокин В.М. Измерительно-вычислительный комплекс СМ-100 для характеристики жидкокристаллических дисплеев / В. М. Сорокин, Р. Я. Зелинский, А. В. Рыбалочка, А. С. Олійник // Технология и конструирование в электронной аппаратуре – 2008. – №1(73) – С. 48–53.
17. Сорокин В. М. Элементы и устройства жидкокристаллической оптоэлектроники: диссертация доктора технических наук: 25.10.2002 / Сорокин Виктор Михайлович. – К., 2002. – 308 с.
18. Rybalochka A. Improvement of 2+2 dynamic drive schemes for cholesteric Displays / A. Rybalochka, V. Sorokin // SID'07 Digest – 2007. – P. 596–598.

Надійшла до редакції 09.10.2010р.

РИБАЛОЧКА АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ – к.т.н., старший науковий співробітник відділу «Рідких кристалів», Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, Київ, Україна.