

Рідкі кристали в телебаченні

Микола Гриценко, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики та астрономії Чернігівського НПУ ім. Т. Г. Шевченка.

Вступ. Телебачення сьогодні є найбільш масовим засобом одержання інформації і стало для людей нормою життя. В останні десятиріччя техніка телевізійного відображення зазнала суттєвих змін – об'ємні і громіздкі вакуумні електронно-променеві трубки (кінескопи) були практично повністю витіснені компактними плоскими рідкокристалічними екранами. Основним елементом будь-якого телевізора є перетворювач електромагнітного відеосигналу в оптичне зображення на екрані. Телевізійний кадр на екрані кінескопа формується шляхом сканування електронного променя, промодульованого електромагнітним сигналом, який несе інформацію про зображення. Електронний промінь управляється потужними магнітами, а трубка живиться високими напругами, які створюють у навколишньому середовищі сильні поля. Екран кінескопа покритий люмінофором, який випромінює шкідливе світло.

Рідкокристалічний телеекран відтворює зображення на принципово відмінному від цього способу і має суттєві переваги перед електронно-променевими трубками: споживає малі потужності, працює за низьких напруг, не випромінює шкідливого люмінесцентного світла, позбавляє користувача дії статичних електричних і магнітних полів. Сучасні рідкокристалічні телевізори відносно недорогі, мають малі габарити і за формою схожі на тонку картинку, яку можна закріплювати на стінку. Вони забезпечують якісне відображення реального світу у його динаміці, кольорі, із врахуванням особливостей зору і дотриманням телевізійних стандартів.

Зображення на рідкокристалічному телеекрані формується окремими елементами, які називаються пікселями. Піксельна технологія передбачає точкову мозаїчну структуру зображення. Окремий піксель створюється мініатюрною рідкокристалічною коміркою, у якій рідкий кристал зміною напруги

управляє інтенсивністю світла, яке проходить через комірку. Сукупність пікселів різної інтенсивності і кольору формує на екрані телевізійний кадр.

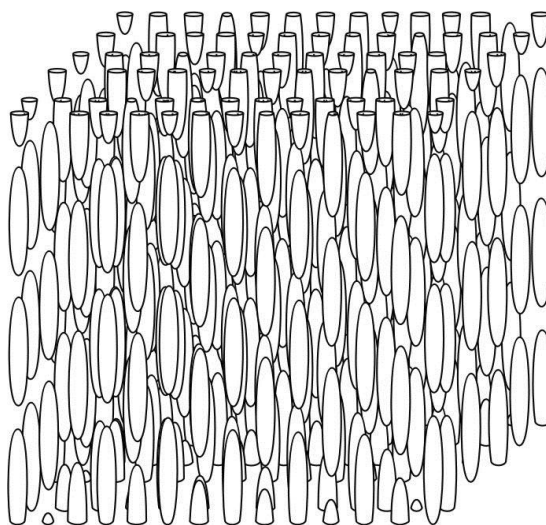
Рідкі кристали*. Рідкі кристали – це речовини, які поєднують у собі одночасно властивості рідини і твердого кристала: вони текучі, як і звичайні рідини, але водночас мають анізотропію фізичних властивостей, характерну для твердих кристалів. Стан речовини з такими двоїстими властивостями називають рідкокристалічним, мезоморфним, або просто мезофазою (грец. «mesos» – проміжний), що означає проміжну фазу. Найбільш вивчені і знайшли широке технічне застосування т. зв. термотропні рідкі кристали. Це органічні речовини, які утворюють мезофазу при плавленні твердого кристала і існують у певному інтервалі температур – від температури плавлення твердого кристала до температури переходу в ізотропну рідину. Інтервал температур існування мезофазы може складати десятки градусів, включаючи кімнатні температури.

Рідкі кристали трапляються серед органічних речовин, молекули яких мають яскраво виражену анізотричну форму, – здебільше видовжену планкоподібну форму. Анізотропія фізичних властивостей рідких кристалів є наслідком певної упорядкованості в розташуванні видовжених молекул. В т. зв. нематичних рідких кристалах (нематиках) такі молекули зберігають однакову орієнтацію в макроскопічних об'ємах, як і у твердих кристалів, але мають здатність поступально переміщуватись, як у рідині. Розташування положень центрів мас молекул нематика та їх орієнтація зображені на мал. 1. Центри мас молекул розташовані так само, як і в ізотропній рідині – відсутній дальній трансляційний порядок. Однак на відміну від звичайних рідин у них зберігається дальній орієнтаційний порядок. Проте цей порядок не такий чіткий, як у твердих кристалах. Внаслідок теплового руху видовжені молекули «розкидані» по напрямках, проте зберігається напрям переважної орієнтації молекул. Напрямок переважної орієнтації молекул прийнято характеризувати

* Більш детально про рідкі кристали див.: «Фізика та астрономія в школі» – 2008. – №3, 4, 5 – 6.

одиничним вектором L , який називають **директором**. При переорієнтації молекул рідкого кристала, наприклад, зовнішнім полем, слід говорити про переорієнтацію директора.

Поширеними є також холестеричні рідкі кристали (холестерики). Молекулярне пакування холестерика на невеликих відстанях (сотні ангстрем) нічим не відрізняється від пакування молекул нематика. Однак молекули холестерика є оптично активними (мають властивість повертати площину поляризації світла), що зумовлює макроскопічну закрученість структури: напрям директора системно змінює свою орієнтацію при переміщенні від шару до шару, утворюючи у просторі спіраль з просторовим періодом P . Холестерик можна вважати закрученим нематиком. Типовими представниками холестериків є етери холестерину. Внаслідок спіральної закрученості холестерики мають унікальні оптичні властивості.



Мал. 1. Розташування молекул у нематиків

Як функціональні матеріали в технічних пристроях рідкі кристали використовують у вигляді тонких плівок, товщина яких складає одиниці – десятки мікрометрів. Тонкі плівки розміщують між двома скляними плоскопаралельними пластинками, на внутрішні поверхні яких нанесені прозорі елект-

роди. Така структура називається рідкокристалічною коміркою, яка є основним елементом будь-якого рідкокристалічного дисплея. Спеціальним обробленням твердих поверхонь, з якими контактує рідкий кристал, досягається однорідна орієнтація директора по всьому об'єму комірки, тобто отримується рідкий монокристал. Для виготовлення якісного рідкокристалічного дисплея необхідно забезпечити по всій площі екрана одну задану орієнтацію молекул (директора). Використовується декілька типів орієнтації директора на твердих поверхнях: планарна, коли директор орієнтований паралельно до поверхні і гомеотропна, коли директор орієнтований перпендикулярно до поверхні. При планарній орієнтації напрям директора повинен бути однаковим по всьому об'єму (однорідна планарна орієнтація).

Найпростішим і найпоширенішим методом створення однорідної планарної орієнтації є метод Шатлена: механічне натирання поверхонь пластин, між якими перебуває рідкий кристал. Якщо потерти поверхню папером, тканиною або хустром у певному напрямку, то на ній створюється мікрорельєф у вигляді паралельних канавок і гребенів, які змушують видовжені молекули рідкого кристала орієнтуватись паралельно цьому напрямку. Приповерхнева однорідна орієнтація внаслідок міжмолекулярної взаємодії упорядкованих молекул поширяться на весь об'єм комірки. Найбільш надійно стабільну гомеотропну орієнтацію одержують, використовуючи поверхнево-активні речовини, наприклад, лецитин. Орієнтуючий шар лецитину наноситься безпосередньо на поверхню. Механізм орієнтації у цьому випадку визначається фізико-хімічною взаємодією молекул рідкого кристала з молекулами орієнтанта.

Унікальною властивістю рідких кристалів є їх висока чутливість до зовнішніх впливів, зокрема, їх здатність суттєво змінювати оптичні властивості під дією низьких напруг (долі вольт – одиниці вольт) при малих споживаних потужностях ($10^{-10} - 10^{-8}$ Вт/м²). Ці електрооптичні ефекти лежать в основі використання рідких кристалів в засобах відображення інформації.

Основою орієнтаційних електрооптичних ефектів є переорієнтація директора під дією зовнішнього поля, яку називають переходом Фредерікса.

Електричне поле безпосередньо діє на молекули, змінюючи їх орієнтацію. Прийнято вважати, що електричне поле діє на діелектричну анізотропію $\Delta\epsilon$, змінюючи орієнтацію директора L (макроскопічний підхід). Дія електричного поля на рідкий кристал залежить від знака діелектричної анізотропії. Є рідкі кристали молекули яких мають дипольний момент направлений уздовж довгої осі молекули або утворює з нею невеликий кут. Рідкі кристали з такими молекулами мають діелектричну проникливість уздовж напрямку директора ϵ_{\parallel} більшу від діелектричної проникливості в перпендикулярному напрямку ϵ_{\perp} . Ця група рідких кристалів має позитивну діелектричну анізотропію: $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp} > 0$. Оскільки диполь в електричному полі повертається вздовж поля, то директор L рідкого кристала з $\Delta\epsilon > 0$ намагається встановитись по полю. Якщо дипольний момент молекули рідкого кристала перпендикулярний до довгої осі молекули або створює з нею кут, близький до 90° , то такий рідкий кристал має негативну діелектричну анізотропію: $\Delta\epsilon < 0$. Директор L рідких кристалів з $\Delta\epsilon < 0$ намагається встановитись перпендикулярно до силових ліній електричного поля. В залежності від знака діелектричної анізотропії ($\Delta\epsilon > 0$, $\Delta\epsilon < 0$), початкової орієнтації директора в комірці (планарна, гомеотропна) та напрямку електричного поля відносно директора в нематиках спостерігаються цілий ряд електрооптичних ефектів, які дозволяють управляти світловими потоками з допомогою незначних електричних сигналів. В електрооптичній комірці при цьому відбуваються оптичні процеси в основі яких лежить явище подвійного променезаломлення.

Подвійне променезаломлення. Світло – це електромагнітна хвиля, яка є поперечною. У природному світлі коливання електричного вектора цієї хвилі перпендикулярні до світлового променя, але мають усі можливі напрямки у площині, перпендикулярній до променя. Якщо електричний вектор світлової хвилі має один визначений напрям коливання, то світло називається плоскополяризованим. Площину, у якій відбуваються ці коливання, називають площиною поляризації. Пристрій, який перетворює природне світло у

поляризоване, називають поляризатором. Площину коливання електричного вектора поляризованого світла, яке виходить з поляризатора, називають площиною поляризатора. Для аналізу стану поляризації світлових променів використовують другий поляризатор, який називають аналізатором. Аналізатор розміщують по ходу променя за поляризатором. Інтенсивність світла, яке пройшло через систему поляризатор-аналізатор, залежить від кута між площинами поляризатора і аналізатора. Якщо поляризатори схрещені, тобто площини поляризації їх взаємно перпендикулярні, то світло через систему не проходить. В якості поляризаторів зазвичай використовують тонкі поляроїдні плівки.

У прозорих анізотропних середовищах (кристалах) швидкість поширення світла залежить від напрямку його поляризації, а отже, від напрямку поширення променя в кристалі. У них можуть поширюватись світлові промені двох типів: звичайний промінь, показник заломлення якого не залежить від напрямку поширення в кристалі, і незвичайний, показник заломлення якого залежить від напрямку поширення в кристалі. Показники заломлення звичайного n_o і незвичайного n_e променів обернено пропорційні відповідним фазовим швидкостям світлових хвиль у середовищі: $n_o = c/v_o$ і $n_e = c/v_e$. Тому звичайний промінь поширюється в усіх напрямках з однаковою швидкістю, як і в ізотропних середовищах, а швидкість поширення незвичайного променя залежить від напрямку в кристалі. При падінні пучка природного світла на такий кристал промінь роздвоюється на звичайний і незвичайний, які є поляризованими у взаємно перпендикулярних площинах. Це явище називають подвійним променезаломленням, яке є ознакою оптичної анізотропії середовища. В такому середовищі існує напрям, у якому подвійне променезаломлення не відбувається, тобто у цьому напрямку швидкості звичайного і незвичайного променів однакові. Цей напрям називають оптичною віссю кристала. Промінь також не роздвоюється, якщо світло в кристалі поширюється перпендикулярно до оптичної осі, але звичайний і незвичайний промені

поширюються у цьому випадку з різними фазовими швидкостями і набувають деякої різниці фаз.

Оптично анізотропними кристалами є нематика. У них оптична вісь збігається з напрямком переважної орієнтації молекул (директора L). Поляризація звичайного променя – перпендикулярна до оптичної осі L , а поляризація незвичайного променя – паралельна цій осі, тобто $n_o = n_{\perp}$, а $n_e = n_{\parallel}$. Оптична анізотропія нематиків позитивна: $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} = n_e - n_o > 0$. Абсолютні значення оптичної анізотропії для різних нематиків мають широкі межі – від 0,02 до 0,5, але найбільш типові значення $\Delta n \approx 0,2$. Унікальна особливість рідких кристалів полягає в тому, що оптичною анізотропією можна легко управляти за допомогою незначних електричних полів. Слабкі електричні поля змінюють орієнтацію директора, уможливлуючи управління подвійним променезаломленням.

Рідкокристалічну комірку розміщують між схрещеними поляроїдами і спостерігають перехід Фредерікса в електричному полі. Переорієнтація директора (оптичної осі нематика) буде супроводжуватись зміною подвійного променезаломлення, а отже і зміною інтенсивності світла, яке проходить через систему. В електрооптичних комірках з однорідною (планарною чи гомеотропною) орієнтацією директора, які освітлюються білим світлом, інтенсивність його на виході аналізатора буде чутливою до довжини світлової хвилі. Тому використання таких комірок в індикаторних пристроях, які працюють при освітленні білим світлом, неможливе внаслідок залежності кольору світлового пучка від напруги. Цього недоліку позбавлені твіст-структури, розміщені між поляризатором і аналізатором, які є ахроматичними і дозволяють електричною напругою управляти інтенсивністю білого світла.

Твіст-ефект. У рідкокристалічних телевізійних екранах використовують орієнтаційний електрооптичний ефект у закручених нематиках, який називають твіст-ефектом. Цей ефект спостерігається у твіст-структурі (англ.

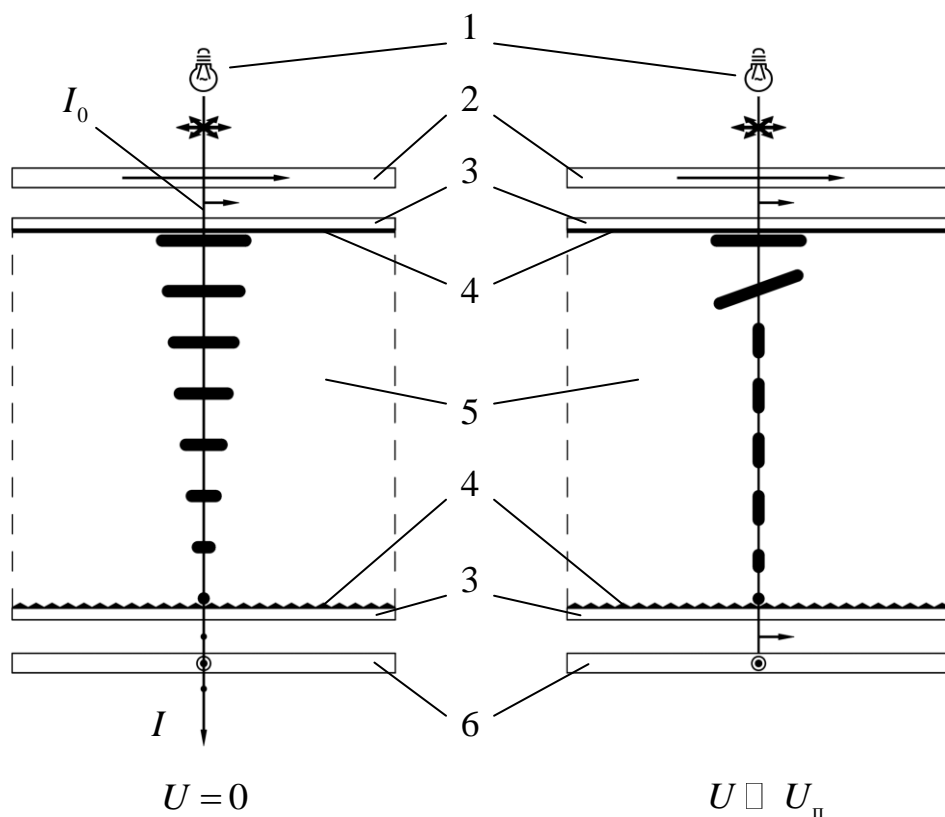
twist – скручування) – закрученому на чверть витка спіралі планарному шарі нематика з позитивною діелектричною анізотропією ($\Delta\epsilon > 0$).

У твіст-ефекті закручена планарна орієнтація нематика дією електричного поля переводиться в гомеотропну. Цей перехід фіксується оптично у вигляді зміни пропускання поляризованого світла при збільшенні напруги. Ефект починається за напруг, вищих від деякої порогової напруги $U_{\text{п}}$. Порогові напруги твіст-ефекту для типових нематиків складають одиниці вольт.

Електорооптична комірка для твіст-ефекту складається з тонкого шару закрученого нематика, розміщеного між двома плоскопаралельними скляними пластинками, внутрішні поверхні яких покриті прозорими електродами. Відстань між пластинками складає 5 – 10 мкм і задається діелектричними прокладками. Для одержання планарної закрученої структури нематика поверхні електродів обробляють (наприклад, натиранням в одному напрямку) і повертають одну з пластинок на 90° . Орієнтація директора на протилежних електродах відповідає напрямку натирання поверхонь, тому стає взаємно перпендикулярною. Орієнтація сусідніх шарів в об'ємі нематика за рахунок сил пружності плавно змінюється на невеликий кут і на всій товщині він становить 90° . Для забезпечення однорідності планарної закрученої структури в нематик іноді вводять невелику концентрацію холестерика.

Утворена твіст-структура є оптично активною, тому повертає вектор поляризації плоскополяризованого світла на 90° . Забезпечується т. зв. хвилеводний режим, коли поворот директора від шару до шару веде за собою вектор поляризації світлової хвилі. У літературі його іноді називають режимом «захоплення поляризації хвилі». Закручена структура працює у хвилеводному режимі за виконання умови Могена: $\lambda \ll P \cdot \Delta n$, де λ – довжина світлової хвилі; P – крок гвинта; $\Delta n = n_{\square} - n_{\perp}$ оптична анізотропія нематика. У твіст-структурі директор утворює спіраль у чверть витка, тому $P = 4d$, а для реальних комірок товщина $d \approx 10$ мкм. Тому умова Могена виконується для довжин хвиль усього видимого діапазону. Це означає, що між схрещеними поляроїдами твіст-структура при освітленні білим світлом є прозорою за відсут-

ності електричного поля: перший поляроїд створює плоскополяризоване світло, твіст-структура повертає вектор поляризації цього світла на 90° , тому воно вільно проходить через другий поляроїд, який також повернутий на 90° відносно першого поляроїда. В електричному полі закручена планарна структура переходить в гомеотропну. У такому нематикі зникає здатність структури повертати площину поляризації світла і тому воно повністю затримується другим поляроїдом. Схему спостереження твіст-ефекту у прохідному світлі для випадку схрещених поляроїдів наведено на мал. 2.



Мал.2. Оптична схема для спостереження твіст-ефекту у прохідному світлі (схрещені поляроїди) (1 – джерело світла; 2 – поляризатор; 3 – скляна пластина; 4 – прозорий електрод; 5 – закручений нематик; 6 – аналізатор)

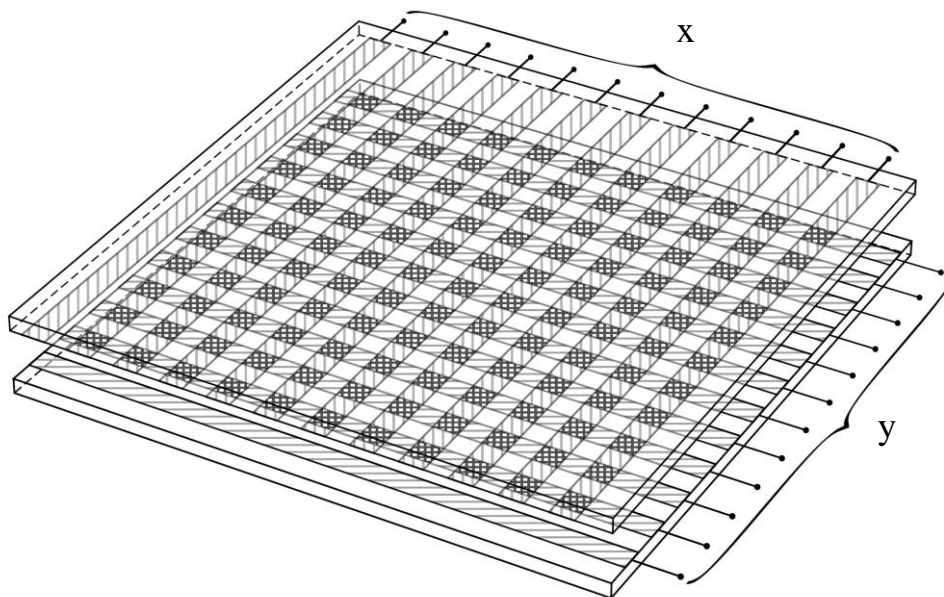
У схрещених поляроїдах пропускання твіст-комірки зі збільшенням напруги зменшується і виходить на насичення. Залежність оптичного пропускання твіст-комірки від напруги має найбільшу крутизну за нормального па-

діння світла на комірку і не залежить від довжини хвилі. Крутизна оптичної характеристики твіст-ефекту є одним із визначальних параметрів для забезпечення якісного зображення на екрані рідкокристалічного телевізора. Ця крутизна залежить від фізичних параметрів нематика. Якість зображення на екрані залежить також від часів вмикання і вимикання електрооптичного ефекту, які також залежать від параметрів нематика. Час вимикання значно більший, ніж час вмикання, оскільки він визначається часом вільної релаксації розкрученої зовнішнім полем структури в початкову закручену. Ця властивість твіст-ефекту дозволяє використовувати його у матричних дисплеях.

Матричний дисплей. Основу плоских рідкокристалічних телевізорів становлять матричні дисплеї. При виготовленні такої матриці на внутрішні опорні поверхні скляних пластинок, між якими знаходиться тонкий шар закрученого нематика, наносять систему прозорих електродів у вигляді вузьких смужок, які взаємно перпендикулярні на протилежних пластинках. (мал. 3). На перетині смужчастих електродів утворюються невеликі елементи матриці, до яких підводиться напруга. Такі елементи можна вважати мініатюрними електрооптичними комірками, які автономно управляються зовнішньою напругою. Кожна мікрокомірка може бути увімкнена чи вимкнена адресним поданням напруги від електронної схеми, регулюючи інтенсивність світлового пучка, що проходить через відповідну мікрокомірку і створює на екрані елемент зображення (піксель). Сукупність окремих пікселів різної інтенсивності формує зображення на екрані (кадр). Оптичні характеристики пікселів (інтенсивність, колір) управляються дією електричного поля на рідкий кристал.

При поданні управляючої напруги до $(x + y)$ електричних виводів підключеними до напруги стануть $(x \cdot y)$ мікрокомірок. Виграш у кількості необхідних виводів зростає пропорційно до кількості пікселів на екрані. У сучасних телевізійних екранах кількість пікселів становить декілька мільйонів. За великої кількості пікселів технологічно було б складно здійснювати по-

дання напруги до кожної мікрокомірки. У цьому полягає найважливіша перевага матричної системи подання сигналу перед іншими системами.



Мал. 3. Матрична система електродів рідкокристалічного дисплея

Технологія рідкокристалічних дисплеїв з матричною адресацією сигналу виявилась досить складною, і процес впровадження її у виробництво тривав понад три десятиріччя. На шляху створення таких дисплеїв виникли технічні і технологічні проблеми, які були успішно розв'язані завдяки досягненням у розвитку фізики рідких кристалів, хімічної технології створення рідкокристалічних матеріалів, а також планарних технологій виготовлення інтегральних мікросхем і виробів індикаторної техніки на рідких кристалах.

У матричних дисплеях на окремий горизонтальний електрод подається збуджувальний імпульс певної напруги та одночасно на вертикальний електрод – інформаційний імпульс з амплітудою, яка несе відомості про зображення. Максимальна напруга буде на перетині електродів. Якщо вона перевищує порогову для твіст-ефекту, то здійснюється перехід Фредерікса і на екрані на світлому тлі виникне темний елемент зображення.

Під меншою напругою перебувають й інші елементи горизонтального і вертикального електродів, тому в них теж відбувається перехід Фредерікса,

але з неповною переорієнтацією директора. Ці мікрокомірки утворюють на екрані сірі елементи зображення. Тому порядкове подання напруги в матричній системі призводить до проблеми, яку називають «ефект хреста».

Висвітлення хреста на екрані є перешкодою для одержання зображення. Цю проблему було вирішено шляхом підбору фізичних параметрів рідкого кристала, який би давав круту вольт-контрастну характеристику твіст-ефекту, а також шляхом забезпечення автономного живлення кожної мікрокомірки матриці, що стало можливим із переходом до використання в дисплеях т. зв. активних матриць. У таких матрицях відсутній вплив процесу адресації сигналу на сусідні комірки, тобто кожний піксель (мікрокомірка) стає електрично ізольованим. Матричні системи живляться низькими змінними напругами прямокутної форми (порядку вольтів), які подаються від складних інтегральних мікросхем управління, виконаних за планарною технологією. Змінні напруги використовують для того, щоб уникнути шкідливого впливу об'ємних зарядів, які завжди утворюються в постійному полі.

Друга проблема, яку було подолано на шляху створення рідкокристалічних екранів, – недостатня швидкодія рідких кристалів при формуванні телевізійного зображення. Для його формування важливими є часові характеристики дисплея, які визначаються характерними часами електрооптичних ефектів у рідких кристалах. Якість зображення, яке формується пікселями, залежить від швидкості їх вмикання і вимикання. Швидкість вмикання пікселя визначається часом вмикання $\tau_{\text{вм}}$ електрооптичного ефекту, а швидкість його вимикання $\tau_{\text{вим}}$ – часом релаксації цього ефекту після зняття напруги. Для забезпечення передачі телевізійного зображення з дотриманням телевізійних стандартів час роботи одного елемента матриці має бути порядку 1 мкс. Це час спрацьовування електрооптичного ефекту, який у рідких кристалах перевищує 1 мкс. Сучасні хімічні технології уможливили створення рідкокристалічних матеріалів із часами спрацьовування, які становлять декілька одиниць мікросекунд. Для забезпечення оптимальної кількості кадрів за секунду (залежно від моделі вона коливається від 20 до 40) час релаксації пікселя пови-

нен перебувати в межах 25÷50 мс. Тоді око людини внаслідок інерційності (~ 40 мс) не помічає ні процесу формування кадру, ні його зміни, і рухоме зображення сприймається неперервно та плавно.

Між часом вмикання $\tau_{\text{вм}}$ пікселя і часом його вимикання $\tau_{\text{вим}}$ має існувати певне співвідношення. Для формування кадру збуджувальний імпульс подається послідовно на всі горизонтальні електроди, доки не заповниться весь кадр. При цьому записана на окремий горизонтальний електрод інформація повинна зберігатись протягом часу формування всього кадру. Виконання цієї умови може забезпечуватись технологічними параметрами рідкого кристала, які визначають відповідні часи вмикання електрооптичного ефекту і релаксації його після вимкнення напруги. Час вмикання $\tau_{\text{вм}}$ має бути нетривалим, а час вимикання $\tau_{\text{вим}}$ – значним. Для формування зображення на екрані оптимальне таке співвідношення між цими часами: $\tau_{\text{вим}} = N \cdot \tau_{\text{вм}}$, де N – кількість горизонтальних електродів. У реальних рідких кристалах $\tau_{\text{вм}} \ll \tau_{\text{вим}}$, але за великих N це співвідношення не реалізується. Величиною N визначається кількість елементів матриці, а отже, і якість зображення. Чим більша кількість електродів, тим краща якість зображення. У сучасних екранах N велике й інерційності рідкого кристала зазвичай не вистачає. Цю проблему було розв'язано також із переходом до використання в дисплеях активних матриць, у яких співвідношення між часами узгоджується спеціальними накопичувальними системами.

У дисплеях на твіст-ефекті застосовують лише активні матриці, у яких на перетині електродних смуг матричної сітки з використанням планарних технологій разом із матрицею виготовляють тонкоплівкові польові транзистори і накопичувальні конденсатори. Ці накопичувальні елементи формуються на основі аморфного кремнію – по одному на кожен піксель. В активних матрицях електричний сигнал, що надходить на мікрокомірку, підсилюється польовим транзистором, забезпечуючи автономність живлення кожної мікрокомірки, і кожний піксель стає електрично ізольованим. Отриманий комірк

кою заряд при цьому зберігається на час сканування матриці, тому кожний окремий транзистор не тільки підсилює сигнал, який надходить на комірку, а й узгоджує співвідношення між часом вмикання комірки і часом її вимкнення. Іноді часу вимкнення не вистачає для формування кадру, тому в кожній мікрокомірці додатково до транзистора створюють тонкоплівковий конденсатор, який підживлює комірку на час циклу сканування. Отже, накопичувальні елементи активної матриці вирішують «проблему хреста», узгоджують часові характеристики дисплея, підвищують швидкість спрацьовування мікрокомірок при поданні і вимкненні імпульсної напруги, поліпшують яскравість і контраст зображення.

У твіст-структурі дисплея використовують планарний шар нематика з позитивною анізотропією діелектричної проникності ($\Delta\varepsilon > 0$), розміщений між скляними пластинками з прозорими електродами і закручений на 90° за відповідною методикою. Для одержання якісного рідкокристалічного дисплея забезпечують одну й ту саму задану орієнтацію рідкого кристала по всій площі матриці, попередньо створивши на поверхні управляючих електродів потрібну мікроструктуру. За відсутності електричного поля закручена структура стає оптично активною – здатною повертати площину поляризації на 90° , тобто забезпечується хвилеводний режим Могена. У твіст-ефекті використовують явище подвійного променезаломлення, яке управляється електричним полем. Тому обов'язковим елементом дисплея є система схрещених поляроїдів, між якими розміщена твіст-структура: вхідний – поляризатор і вихідний – аналізатор.

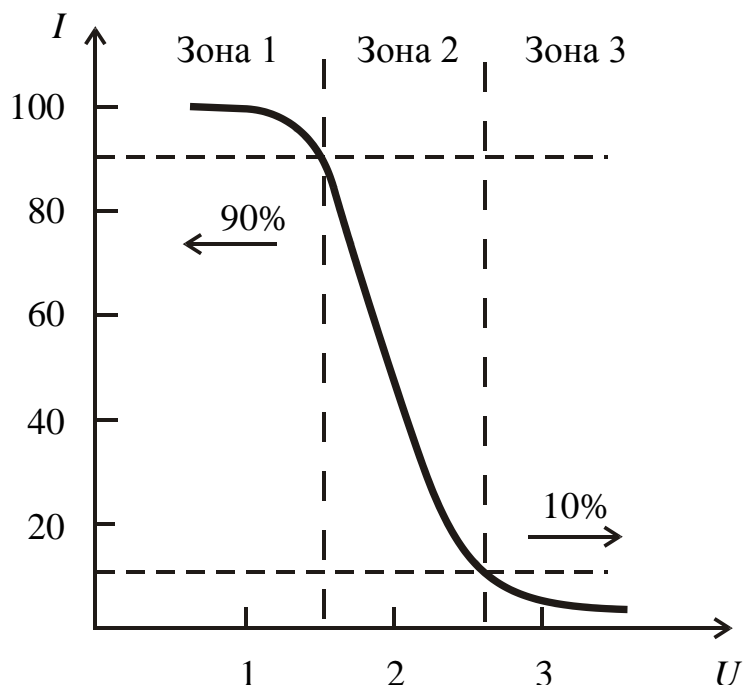
Рідкокристалічна матриця складається з системи мікрокомірок, що автономно управляється електричною напругою. Кожна мікрокомірка створює на екрані піксель зображення певної інтенсивності, а система пікселів формує зображення на екрані. У всіх мікрокомірках матриці відбуваються однакові процеси: поляризатор перетворює природне світло на плоскополяризоване; твіст-структура, будучи оптично активною, повертає площину поляризації світла разом із поворотом директора; світло безперешкодно проходить

через аналізатор, який також повернутий відносно поляризатора на 90° . У цьому випадку на екрані утворюється світлий піксель. Під дією електричного поля, вищого від порогових значень, спіраль розкручується і планарна закручена структура переходить у гомеотропну. Хвилеводний режим Могена порушується, мікрокомірка перестає повертати площину поляризації світла, і воно не проходить через аналізатор. На екрані утвориться темний піксель. Отже, принцип дії рідкокристалічних дисплеїв ґрунтується на режимі Могена, який управляється електричним полем.

Інтенсивність світлового пучка, який пройшов через мікрокомірку, змінюється залежно від прикладеної напруги. Тому рівні яскравості пікселів управляються напругою, яка плавно переводить кожний піксель від білого до чорного через різні градації сірого. На кривій пропускання твіст-ефекту можна виокремити три характерні зони, які відповідають різним етапам розкручування спіралі (мал. 4). Зона 1 відповідає максимуму пропускання і білому кольору пікселя, коли спіраль практично закручена (режим Могена). Зона 3 – мінімуму пропускання і чорному кольору пікселя, коли спіраль майже розкручена. У зоні 2 є всі відтінки сірого кольору. Оскільки час вмикання електрооптичного ефекту умовно відлічується між моментами зміни електрооптичного відгуку рідкокристалічної комірки від 10% до 90% його максимального значення, то цим діапазоном оптичного пропускання визначаються і характерні зони на оптичній характеристиці твіст-ефекту. Інтенсивність світлового пучка за будь-якої напруги не залежить від довжини хвилі цього світла, оскільки режим Могена виконується для довжин хвиль усього видимого діапазону. Це пояснює використання твіст-ефекту в дисплеях, які працюють при освітленні білим світлом. За плавної зміни напруги молекулярна спіраль розкручується, хвилеводний режим порушується, і при освітленні білим світлом інтенсивність світлових пучків проходить через весь спектр градацій сірого кольору. Плавне регулювання інтенсивності світла напругою можливе лише з використанням активної матриці.

У матричній системі електродів скануюча напруга подається на мікро-

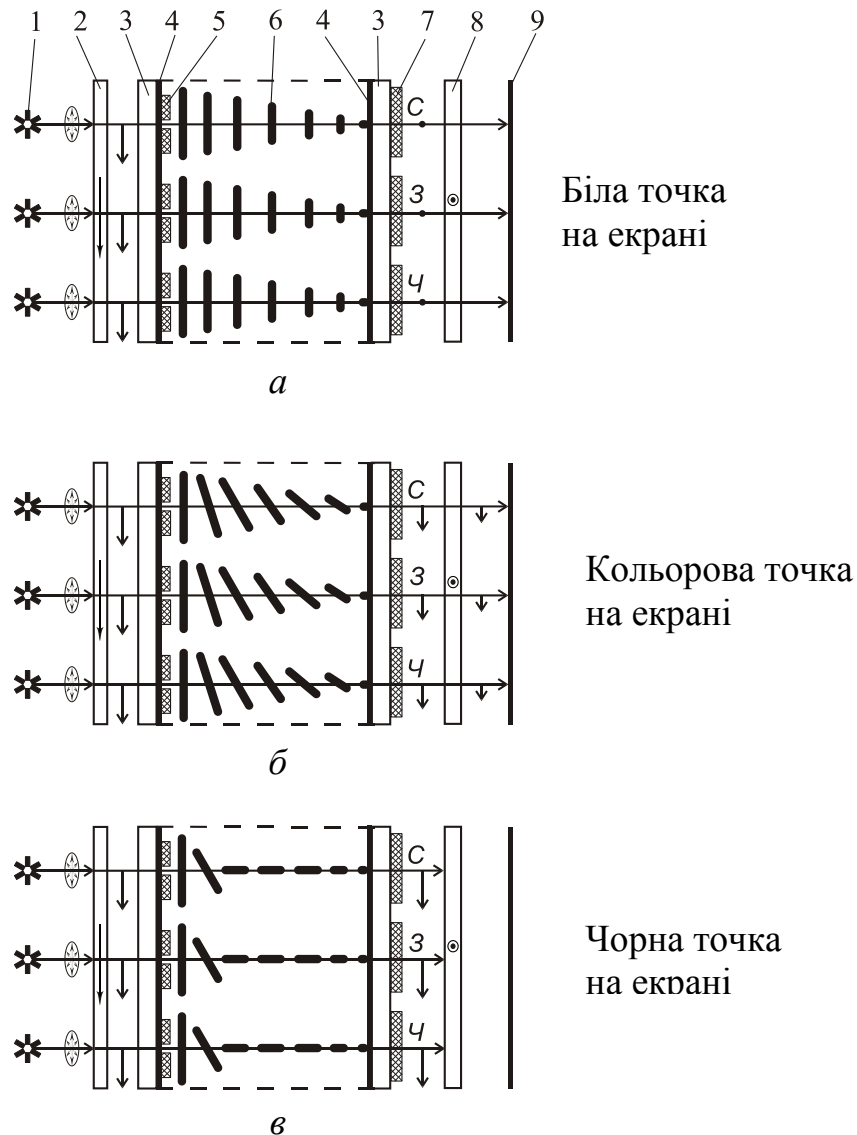
комірки по черговому, створюючи на екрані пікселі різної інтенсивності, які формують чорно-білий кадр. На таких принципах було створено спочатку чорно-білі рідкокристалічні екрани.



Мал.4. Крива оптичного пропускання твіст-комірки

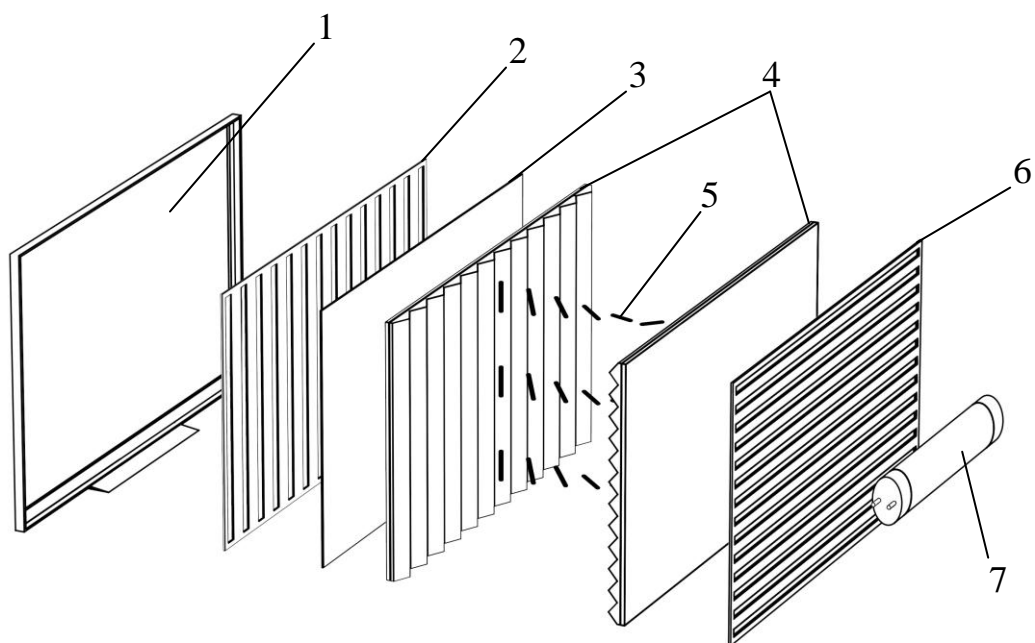
У кольорових матричних дисплеях для формування зображень кожний піксель ділять на три незалежні субпікселі (субпіксельна тріада). Тому кількість незалежних мікрокомірок із тонкоплівковими польовими транзисторами і накопичувальними конденсаторами збільшується втричі порівняно з монохромними дисплеями. Мікрокомірки кожного із субпікселів містять мініатюрні оптичні фільтри синього, зеленого та червоного кольорів, які наносяться безпосередньо на скляні пластинки. Отже, субпіксельна тріада – це сукупність світлофільтрів червоного, зеленого і синього кольорів, тонкоплівкових польових транзисторів і зарядових конденсаторів, кількість яких відповідає загальній кількості субпікселів матриці. Кожна мікрокомірка субпікселя управляється окремим транзистором, який видає власну напругу, розкручує молекулярну спіраль, змінюючи інтенсивність світла і яскравість субпікселя. Зміною яскравості кожного із субпікселів тріади досягається змішу-

вання кольорів. Змішування кольорів від трьох субпікселів у відповідних пропорціях забезпечує будь-який колір на екрані з усіма його відтінками. Кількість кольорів і їх відтінків залежить від спектра градацій сірого кольору в монохромних дисплеях на твіст-ефекті, який характеризується плавною кривою залежності пропускання від напруги (див. мал. 4). Якщо повністю ві-



Мал. 5. Оптична схема окремого пікселя активної матриці ($a - U = 0$;
 $b - U > U_{\text{п}}$; $v - U \leq U_{\text{п}}$; 1 – система тильного підсвічування;
 2 – поляризатор; 3 – скляна пластина; 4 – прозорий електрод;
 5 – тонкоплівкові польові транзистори і конденсатори; 6 – закручений
 нематик; 7 – оптичні фільтри: синій, зелений, червоний;
 8 – аналізатор; 9 – екран)

дкриті всі субпікселі тріади, то разом вони створять білу точку на екрані. Якщо на субпікселі тріади подають напругу, здатну зруйнувати молекулярну спіраль, переорієнтувавши директор у напрямку електричного поля, то світло між схрещеними поляроїдами не пройде і точка на екрані стане чорною. На мал. 5 наведено структуру і режим пропускання світла окремої мікрокомірки матричного кольорового дисплея за різних значень напруги. Отже, інтенсивність світла тріади субпікселів формують відповідний колір, а сукупність пікселів – кольорове зображення на екрані.



Мал. 6. Структура матричного рідкокристалічного дисплея
(1 – екран; 2 – аналізатор; 3 – система оптичних фільтрів; 4 – скляні пластини з матричною системою електродів; 5 – закручений нематик; 6 – поляризатор; 7 – система тильного підсвічування)

Сучасний матричний рідкокристалічний дисплей – це складна багатопшарова структура, виготовлена з використанням планарних технологій (мал. 6). Основним її робочим елементом є закручений на чверть гвинта нематичний рідкий кристал, розташований між двома опорними поверхнями

пластинок, виготовлених із дуже чистого скла. Товщина рідкокристалічного шару задається діелектричними прокладками і становить $6 \div 8$ мкм. Для забезпечення однорідності по товщині між опорні пластинки у процесі механічного складання дисплея вводять спеціальні калібрувальні кульки. Внутрішні поверхні скляних пластинок покривають прозорими електродами матричного типу.

У процесі виготовлення матричної рідкокристалічної панелі за планарними технологіями наносять сотні мікроскопічних електродів і виводів до них, тонкоплівкових польових транзисторів і накопичувальних конденсаторів, забезпечуючи їх прозорість і низький опір. Після складання структура з рідким кристалом герметизується. Матрична твіст-структура розміщена між двома схрещеними поляроїдами. Завдяки паралельним канавкам, попередньо нанесеним на електроди, молекули нематика однаково орієнтуються біля електродів у всіх мікрокомірках матриці.

Рідкокристалічні екрани не є самосвітними. Оскільки монітор працює у прохідному світлі, то з тильного від екрана боку створюють систему підсвічування розсіяним білим світлом. Використовують потужні газонаповнені лампи із системою бокових дзеркал або світловодів для забезпечення однорідного освітлення дисплея. Ресурс ламп значно менший від часу роботи електроніки дисплея, тому в дорожчих моделях разом із дисплеєм ставлять декілька резервних ламп підсвічування, доводячи загальну кількість до чотирьох. У сучасних моделях підсвічування може здійснюватись світлодіодами.

Управляючі електричні імпульси виробляються мікропроцесором, а електронна схема, скануючи, адресно подає їх на певну комбінацію електродів, забезпечуючи живлення мікрокомірок. Управляюча інтегральна схема розташована зазвичай по краях рідкокристалічного дисплея у вигляді окантовки. Світловий потік із тильного боку падає на матрицю мікроскопічних твіст-комірок, розташованих між схрещеними поляроїдами, які вибірково формують пучки різної інтенсивності, створюючи відповідні пікселі і зображення на екрані. Подальші перспективи розвитку телевізійних технологій

пов'язуються з біль широким впровадженням у практику рідкокристалічних телевізійних екранів, які не обмежуються розмірами – від мініатюрних наручних телеекранів до великих настінних панелей.

Література

Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов /
Л. М. Блинов. – М. : Наука, 1978. – 384 с.

Гриценко М.І. Фізика рідких кристалів / М. І. Гриценко. – К. : Академія, 2012. – 272 с.

Рідкокристалічна електроніка / [З. Ю. Готра, Р. Я. Зелінський, З. М. Микитюк та ін.]; за ред. проф. З. Готри. – Львів: Апріорі, 2010. – 532 с.