

ФИЗИКА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ДИСПЛЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Доронин Д.С., студент

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Кургузова О.Э. – старший преподаватель

Аннотация. В работе рассматриваются физические основы жидких кристаллов и их практическое применение в современных дисплейных технологиях. Описаны основные типы жидких кристаллов (нематические, смектические, холестерические) и механизм их взаимодействия с электрическим полем на основе эффекта Фредерикса. Разобран принцип работы жидкокристаллических дисплеев (LCD), включая анализ технологий TN, IPS и VA. Рассмотрены перспективные направления развития, включая гибкие дисплеи и полимерно-дисперсные жидкие кристаллы. Материалы работы могут быть полезны для понимания физики современных экранов и телевизоров.

Жидкие кристаллы (ЖК) представляют собой особое агрегатное состояние вещества, промежуточное между изотропной жидкостью и кристаллическим твёрдым телом. В этом состоянии вещество сохраняет текучесть жидкости, но при этом обладает анизотропией оптических, электрических и магнитных свойств, характерной для кристаллов [1]. Открытие жидкокристаллического состояния принадлежит Ф. Рейнитцеру, который в 1888 г. обнаружил, что холестерилбензоат при нагревании проходит через мутную фазу, обладающую двойным лучепреломлением [2]. Благодаря работам этого учёного и его последователей, в XX веке были раскрыты физические механизмы, лежащие в основе жидкокристаллических явлений, что позволило создать на их основе дисплейные технологии.

По характеру молекулярного упорядочения жидкие кристаллы подразделяются на три основных типа: нематические, смектические и холестерические [1]. В нематических жидких кристаллах молекулы ориентированы преимущественно вдоль одного направления, определяемого вектором-директором \vec{n} , однако их центры масс расположены хаотично. Нематики обладают оптической и диэлектрической анизотропией и являются наиболее распространённым типом, используемым в дисплейных устройствах. Смектические жидкие кристаллы, помимо ориентационного порядка, обладают также одномерным позиционным порядком — молекулы организованы в слои с определённым расстоянием между ними. Слоистая структура смектиков делает их более вязкими, что ограничивает их применение в быстродействующих дисплеях, однако они находят применение в специализированных устройствах. Холестерические жидкие кристаллы представляют собой разновидность нематических, в которых директор \vec{n} непрерывно поворачивается в пространстве, образуя спиральную структуру с определённым шагом [2]. Эта уникальная спиральная организация молекул приводит к селективному отражению света определённых длин волн и яркой интерференционной окраске.

Ключевым свойством жидких кристаллов, обеспечивающим их применение в дисплейных технологиях, является способность молекул переориентироваться под действием внешнего электрического поля. Данное явление описывается эффектом Фредерикса — пороговым переходом ориентации директора при достижении критического значения напряжённости поля [3]. Этот эффект, открытый советским физиком В.К. Фредериксом в 1927 году, стал основой для создания всех современных ЖК-дисплеев. Пороговое напряжение перехода Фредерикса определяется выражением:

$$U_c = \pi \sqrt{\frac{K}{\varepsilon_0 \Delta\varepsilon}}, \quad (1)$$

где K — модуль упругости Франка; ε_0 — электрическая постоянная; $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$ — анизотропия диэлектрической проницаемости жидкого кристалла [3]. Типичные значения порогового напряжения составляют 1-3 В, что является исключительно низким по сравнению с другими электрооптическими материалами, обеспечивая высокую энергоэффективность и быстрый отклик ЖК-дисплеев. Константа Франка K характеризует упругость молекулярной структуры ЖК и зависит от типа деформации (изгиб, кручение или сплейсинг).

Принцип работы жидкокристаллического дисплея (LCD) основан на управлении поляризацией света. Конструкция типичного LCD-элемента включает два поляризатора, скрещённых под углом 90° , между которыми расположен слой жидкого кристалла и два прозрачных электрода из оксида индия-олова (ITO) [4]. В отсутствие электрического поля молекулы нематического жидкого кристалла, закрученные на 90° ориентирующими слоями подложек (так называемая твист-структура), поворачивают плоскость поляризации проходящего света на 90° , и свет проходит через второй поляризатор, создавая яркое (белое) изображение. При подаче напряжения, превышающего пороговое значение, молекулы переориентируются вдоль направления электрического поля, твист-структура разрушается, вращение плоскости поляризации прекращается, и свет

блокируется вторым поляризатором [4]. Регулируя величину приложенного напряжения, можно плавно изменять степень переориентации молекул и контролировать интенсивность проходящего света, получая различные уровни яркости пикселя.

В современных дисплейных технологиях используются различные модификации жидкокристаллических ячеек. Технология TN (Twisted Nematic) основана на описанном выше принципе закручивания молекул на 90° и отличается высоким быстродействием (время отклика 1–5 мс), что делает её популярной для игровых мониторов и бюджетных дисплеев, однако имеет ограниченные углы обзора и посредственную цветопередачу [5]. Технология IPS (In-Plane Switching), разработанная компанией Hitachi в 1996 году, использует горизонтальное расположение электродов на одной подложке, что позволяет переориентировать молекулы в плоскости экрана и обеспечивает широкие углы обзора до 178° и высокую точность цветопередачи (время отклика 4–8 мс) [5]. Эта технология стала стандартом для смартфонов, планшетов и профессиональных графических мониторов. Технология VA (Vertical Alignment) применяет вертикальную начальную ориентацию молекул с положительной диэлектрической анизотропией ($\epsilon_0 > 0$), что обеспечивает исключительно высокую контрастность изображения [5]. VA-матрицы обладают глубоким чёрным цветом и статической контрастностью до 3000:1, но могут проявлять цветовые сдвиги при экстремальных углах просмотра. Выбор технологии зависит от конкретного применения: TN используется, где критична скорость отклика, при IPS требуется точная цветопередача и широкие углы обзора, VA нужна для максимальной контрастности.

Важной характеристикой жидкокристаллических дисплеев является температурная стабильность, поскольку мезофаза существует в ограниченном диапазоне температур, что определяет условия эксплуатации устройств [1]. Современные ЖК-композиции представляют собой многокомпонентные смеси органических соединений, что позволяет существенно расширить рабочий температурный диапазон и улучшить эксплуатационные характеристики дисплеев [3]. Значительное влияние на качество изображения оказывает также ориентация молекул на границе с подложкой, которая формируется специальной обработкой ориентирующих слоёв [2]. В современных матрицах применяется активная адресация с использованием тонкоплёночных транзисторов (TFT), обеспечивающая независимое управление каждым пикселем и высокое качество динамического изображения [5].

Помимо классических LCD-дисплеев, жидкие кристаллы находят применение и в перспективных технологиях. Полимерно-дисперсные жидкие кристаллы (PDLC) используются в «умных» окнах с электрически переключаемой прозрачностью, где микроскопические капельки ЖК диспергированы в полимерной матрице [6]. Без напряжения такое окно рассеивает свет и выглядит матовым, а при подаче электрического напряжения молекулы ЖК выстраиваются, и окно становится прозрачным. Эта технология находит применение в офисных перегородках, автомобилях и архитектурных конструкциях. Холестерические жидкие кристаллы применяются в отражательных дисплеях с бистабильной памятью, не требующих энергии для поддержания изображения после переключения пикселя [6], что делает их идеальными для электронных ценников и электронных книг. Активно развиваются гибкие жидкокристаллические дисплеи на полимерных подложках, позволяющие создавать изогнутые, сгибаемые и даже сворачиваемые дисплеи для использования в носимой электронике и инновационных устройствах. Жидкокристаллические пространственные модуляторы света (SLM) находят применение в адаптивной оптике для коррекции искажений в телескопах, голографии, 3D-дисплеях и технологиях виртуальной и дополненной реальности [6].

Таким образом, жидкие кристаллы представляют собой уникальный класс материалов, физические свойства которых — анизотропия, чувствительность к электрическому полю и способность управлять поляризацией света — обусловили их широчайшее применение в дисплейных технологиях. Эффект Фредерикса позволяет эффективно и энергоэкономично управлять оптическими характеристиками ЖК-устройств при низких напряжениях. Разнообразие существующих технологий LCD-матриц демонстрирует адаптивность жидкокристаллических материалов для различных задач — от высокоскоростных игровых мониторов до профессиональных дисплеев с идеальной цветопередачей. Дальнейшее развитие этой области связано с созданием новых жидкокристаллических композиций с улучшенными электрооптическими характеристиками, совершенствованием методов управления молекулярной ориентацией и расширением областей применения ЖК-технологий в информационных и оптических системах будущего.

Список использованных источников:

1. Де Жен, П. Ж. *Физика жидких кристаллов* / П. Ж. де Жен, Ж. Пру. — М. : Мир, 1982. — 488 с.
2. Блинов, Л. М. *Электро- и магнитооптика жидких кристаллов* / Л. М. Блинов. — М. : Наука, 1978. — 384 с.
3. Сонин, А. С. *Введение в физику жидких кристаллов* / А. С. Сонин. — М. : Наука, 1983. — 320 с.
4. Yeh, P. *Optics of Liquid Crystal Displays* / P. Yeh, C. Gu. — 2nd ed. — Hoboken : Wiley, 2010. — 640 p.
5. Den Boer, W. *Active Matrix Liquid Crystal Displays: Fundamentals and Applications* / W. Den Boer. — Burlington : Newnes, 2009. — 256 p.
6. Yang, D.-K. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* / D.-K. Yang, S.-T. Wu. — 2nd ed. — Chichester : Wiley, 2014. — 592 p.