

уменьшения периодичности их очистки и замены, а также уменьшения или полного отказа от использования ископаемого топлива.

### Литература

1. Reker, S. Investigation of vertical solar power plants into a future German energy system / S. Reker, J. Schneider, C. Gerhards // Smart Energy. – 2022. – Vol.7. – P. 100083-1–100083-12.

2. Fang, H. Radiative cooling for vertical solar panels / H. Fang [et al.] // eScience. – 2024. – Vol. 27, Iss. 2. – P. 108806-1–14.

3. Есман, А. К. Исследование вертикально ориентированной солнечной батареи при воздействии концентрированного солнечного излучения / А.К. Есман, Г.Л. Зыков, В.А. Потачиц, В.К. Кулешов // Наука и техника. – 2023. – Т.22, № 5. – С. 405–410.

4. Heat Transfer Module. Analyze Thermal Effects with Advanced Simulation Software. COMSOL, Inc. USA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.comsol.com/heat-transfer-module>. – Дата доступа: 03.03.2024.

5. Есман, А. К. Моделирование тонкопленочных солнечных элементов со структурой халькопирита  $\text{CuInSe}_2$  / А.К. Есман, В.К. Кулешов, В.А. Потачиц, Г.Л. Зыков // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2020. – Т. 63, № 1. – С. 5–13.

УДК 621.396:535.8

### **Продольные домены в ЖК пикселях матричных устройств, не имеющие флексоэлектрической природы**

Есман А. К., Зыков Г. Л., Потачиц В. А.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*Жидкие кристаллы обладают ориентационной упорядоченностью и высокой подвижностью, что приводит к их широкому применению в различных сферах жизнедеятельности. Исследования показали, что в слое жидкого кристалла формируется новый тип продольных доменов, связанных с начальным азимутальным отклонением молекул кристалла от планарной ориентации на подложках ЖК-устройств.*

В 1888 году были открыты некоторые органические вещества, обладающие свойствами текучести и анизотропии, получившие название в 1904 г. «жидкие кристаллы» (ЖК). Долгое время научная общественность не признавала ЖК. Только после того, как Дж. Фергюсон использовал в 1963 г. их для обнаружения невидимых невооруженным глазом тепловых полей,

к ЖК возник практический интерес. Начиная с 1973 г. эти вещества получили применение в разных сферах жизни человека: в промышленности, медицине, транспорте и т.д. В настоящее время жидкокристаллические дисплеи (ЖК) стали чрезвычайно популярными благодаря своей эффективности и качеству изображения [1]. Разработка первого цветного ЖК-дисплея в 1987 году является значимым событием в истории технологий дисплеев и показала новые возможности в отображении цветной графики и видео. Это открытие имело огромное значение для мобильной техники, телевизоров, мониторов и других устройств, которые мы используем ежедневно [2]. Современные дисплеи представляют собой сложную структуру, объединяющую огромное число отдельных пикселей.

Данная работа посвящена исследованию формирования в жидкокристаллических пикселях продольных доменов. Были использованы лабораторные образцы многоканальных ЖК-устройств с различной шириной (20–500 мкм) и толщиной (0,05–0,1 мкм) прозрачно-проводящих ( $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$ ) электродов. В качестве ЖК использовались смеси на основе толанов с низкочастотной (20 кГц) инверсией знака диэлектрической анизотропии  $\Delta\epsilon$  (от +1 до -1,5). Толщина ЖК-слоя выбиралась от 5 до 20 мкм. Оптическая анизотропия слоя составляла 0,2. Молекулы данного жидкого кристалла не обладают дипольными моментами. Начальная планарная ориентация молекул ЖК задавалась пленками поливинилового спирта, создавались *T* и *S* ориентации [3; 4]. В качестве управляющего электрического поля использовались прямоугольные импульсы положительной полярности. Начальные азимутальные отклонения в ориентации молекул ЖК приводят к тому, что различные части слоя располагаются под разными по знаку углами по отношению к направлению управляющего электрического поля, что приводит к их беспороговой переориентации. При увеличении управляющего поля в этот процесс вовлекаются соседние молекулы, обладающие меньшим преднаклоном, так возникают две области. Эти области молекул с противоположными искажениями встречаются в центральном по толщине ЖК слое и компенсируют друг друга. Толщину этой области обозначим через  $2D$ . Молекулы жидкого кристалла в этой области отклоняются на угол от  $+\theta_0$  на верхнем крае области до  $-\theta_0$  на нижнем. Таким образом, образуются две области с противоположной ориентацией. Граничная область между ними является согласно [5] клиновидной дисклинацией “силы”  $m = 1/2$ . Дисклинация располагается перпендикулярно направлению ориентации молекул ЖК в центральной области слоя вдоль диагонали квадратного пикселя. На рис. 1 представлена схема расположения молекул ЖК в пикселе для *S*-эффекта в электрическом поле.

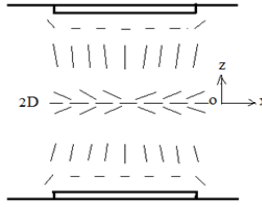


Рис. 1. Схема распределения молекул ЖК в квадратном пикселе

Внешнее электрическое поле направлено вдоль оси  $OX$ , а две области, разделенные линией дисклинации (положительная и отрицательная), обладают электрической энергией на единицу площади в плоскости пикселя. Эта энергия согласно [5] равна:

$$F = -\frac{\Delta\varepsilon}{8\pi}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})^2,$$

где единичный вектор  $\mathbf{n}$  описывает искаженное состояние молекул ЖК, в нашем случае  $n_x = \cos\theta$ .

Тогда, например, положительная область толщиной  $2D$  будет обладать плотностью энергии

$$F^+ = -\frac{\Delta\varepsilon E^2}{8\pi} \int_{-D}^{+D} \cos^2\theta \cos^2(90-\theta) dz.$$

Вычислив это выражение, получаем, с учетом линейной зависимости азимутального угла отклонения молекул кристалла от планарности в переходной области  $\left(\theta = \frac{\theta_0}{D} z\right)$ :

$$F^+ = -\frac{\Delta\varepsilon E^2 D}{32\pi} \left(1 - \frac{\sin(4\theta_0)}{4\theta_0}\right).$$

Аналогичное выражение получаем для отрицательной области. Рассмотрим теперь полную энергию положительной области площадью  $l^2/4$  ( $l$  – диагональ квадратного пикселя)

$$\psi = -F^+ \frac{l^2}{4} + l\psi + \text{const},$$

где  $\psi$  – энергия на единицу длины дисклинации, зависящая только от упругих постоянных ЖК [6].

Положительная область будет в равновесии если

$$\frac{\partial \psi}{\partial l} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{2\psi}{l} = F^+.$$

Таким образом, электрическая энергия на единицу площади положительной области (она способствует увеличению площади при росте управляющего поля) уравнивается силой натяжения дисклинации. Аналогичное заключение получаем для отрицательной области. Значит, в этом случае линия дисклинации будет располагаться строго по диагонали квадратного пикселя. При уменьшении диэлектрической анизотропии ЖК электрическая энергия областей  $F^+$  и  $F^-$  уменьшается, что приведет к уменьшению силы натяжения линии дисклинации, в результате две области придут в движение навстречу друг другу. Значения величин  $F^+$  и  $F^-$  равны, поэтому площади полученных областей останутся равными. Границей между этими областями будет растянутая линия дисклинации.

На рис. 2 представлена динамика образования продольных доменов в ЖК пикселе при уменьшении диэлектрической анизотропии ЖК.

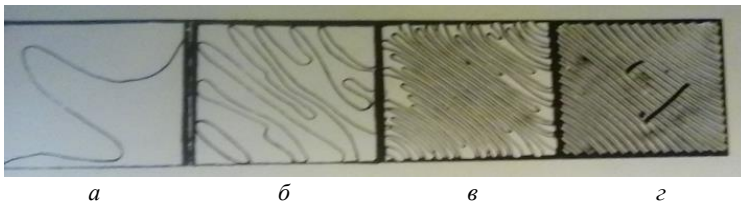


Рис. 2. Динамика образования продольных доменов в ЖК пикселе при частоте импульсов управления электрического поля:

$a$  – 18 кГц;  $б$  – 19 кГц;  $в$  – 19,5 кГц;  $г$  – 19,8 кГц;  
амплитуда – 10 В; создавалась  $T$ -ориентация; толщина ЖК-слоя 10 мкм;  
ширина электродов 100 мкм

Проведенные исследования показывают, что в слое ЖК возникает новый тип продольных доменов, не имеющих флексоэлектрической приро-

ды, а связанных с начальным азимутальным отклонением молекул кристалла от планарной ориентации на подложках ЖК-устройств.

### Литература

1. Самарин, А. Тенденция развития сектора ЖК-телевизоров со светодиодной подсветкой / А. Самарин // Компоненты и технологии. – 2010. – № 4. – С. 98–102.
2. Инфракрасный многоспектральный матричный преобразователь: пат. № 12175 Респ. Беларусь: МПК G01J 5/02, G01K 11/00 / А. К. Есман, В. А. Пилипович, В. К. Кулешов, Г. Л. Зыков; дата публ. 30.08.2009.
3. Развин, Ю. В. Эффект сжатия твистовой ЖК-структуры в импульсном электрическом поле / Ю. В. Развин, В. А. Потачиц // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф., 2009. – Минск, 2009. – Т. 2. – С. 375.
4. Развин, Ю. В. Роль поверхности в электрооптике твист-эффекта в жидких кристаллах / Ю. В. Развин, В. А. Потачиц // Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания: материалы междунар. науч.- практ. конф., посвященной 100-летию МГУ им. А. А. Кулешова, 2013. – Могилев, 2013. – С. 18–21.
5. Де Жен, П. Физика жидких кристаллов / П. де Жен. – М.: Мир, 1977. – 400 с.
6. Пикин, С. А. Структурные превращения в жидких кристаллах / С. А. Пикин. – М.: Наука, 1981. – 336 с.

УДК 538.945

### Условия получения и пьезоэлектрические свойства керамических материалов на основе системы $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbZrO_3-PbTiO_3$

Савчук Г. К., Юркевич Н. П.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

*В работе представлены результаты исследований влияния условий получения керамики системы  $Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3-PbZrO_3-PbTiO_3$ , модифицированной цинком и медью, на их пьезоэлектрические параметры. Показано, что наличие оксида меди изменяет механизм спекания на жидкофазный, снижая температуры спекания на (200-240) °С. Установлено, что высокими пьезопараметрами керамики обладают при введении микродобавок в соотношении 3 масс. % ZnO + 1масс. % CuO и температуре спекания 960 °С.*