

Разработка модуля торцевой подсветки для автостереоскопического дисплея¹

Ч.-М. ХУН, К.-Л. ЛИ*, Ч.-Е. ЛИН, М.-В. ЧЕН, Д.-Д. ВУ

Национальный Технологический Университет города Тайбэй, Тайвань

*E-mail: klee@ntut.edu.tw

Аннотация

Работа посвящена изучению и оптимизации модуля торцевой подсветки для трёхмерного жидкокристаллического дисплея мобильного телефона. Модуль спроектирован с микроструктурами на верхней и нижней поверхностях светопроводящей пластины, чтобы обеспечить мультиплексированную во времени проекцию света в глаза наблюдателя. Модель модуля создана с помощью оптического программного обеспечения (TracePro) и жидкокристаллического программного обеспечения (LCDMaster 2D). Результаты эффективно устраняют необходимость в призматических панелях и удовлетворяют трём основным показателям производительности, а именно: угол излучения света, равномерности освещения и устранение перекрёстных помех.

Ключевые слова: геометрическая оптика, оптика в вычислительной технике, проектирование и изготовление оптики, физическая оптика.

1. Введение

В связи с постепенной популярностью трёхмерных изображений в повседневной жизни люди наслаждаются трёхмерным изображением, вызванным сенсорной стимуляцией. Автостереоскопические дисплеи работают путём испускания двух лучей света под разными углами для левого и правого глаз зрителя, тем самым создавая стереоскопическое изображение [1,2]. Этот метод называется мультиплексированным-2D, то есть он использует 2D-экран для получения 3D-изображений, и этот способ можно разделить на два основных типа: пространственно-мультиплексированные и мультиплексированные во времени. Современная технология пространственно-мультиплексированного типа для автостереоско-

пических дисплеев требует, чтобы периодическое полосатое покрытие, призматическая панель или ленточные растрсы создавали для правого глаза и левого глаза две группы сигналов одновременно, при этом не только яркость и разрешение будут снижаться, но и будут большие потери энергии [3–6]. Технология мультиплексированного во времени типа периодически генерирует левое изображение и правое изображение, проецируя левый и правый глаз соответственно. Частота этого сигнала больше частоты зрительного восприятия, что позволяет наблюдателю порождать стереоскопическое зрение [7–15]. Модуль торцевой подсветки может снизить затраты, если он может быть разработан для создания света только для левого и правого глаза с помощью светопроводящей пластины (СПП). В этом исследовании предлагается использовать торцевую подсветку для мультиплексированных во времени стереоскопических дисплеев для мобильных телефонов.

Левый и правый глаз наблюдателя перпендикулярен направлению излучения. Углы излучения для глаз наблюдателя составляют примерно $\pm 10^\circ$, как показано на рис. 1. СПП может обеспечить яркость в нужном направлении и равномерность выходящего света [16–19].

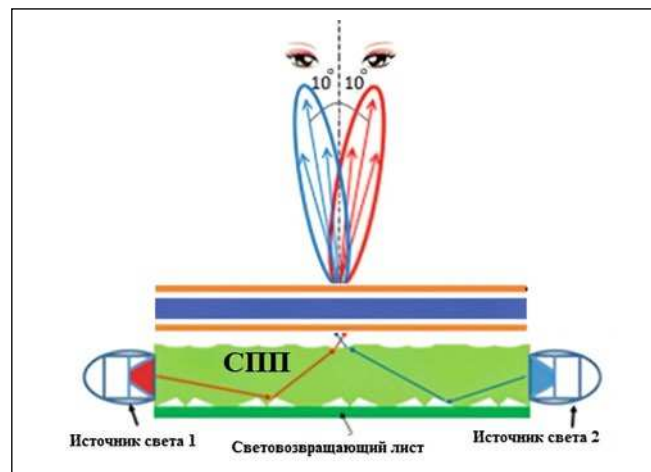
Мы проектируем 5,0-дюймовую СПП с временным мультиплексированием, чтобы генерировать два узконаправленных ИС на основе оптимизированных микроструктурных панелей. Когда ИС слева и справа активны, СПП может излучать свет непосредственно в правый и левый глаз наблюдателя соответственно.

Благодаря связи между последовательно переключающимися источниками света и жидким кристаллом левый и правый глаз может получать два сигнала для достижения стереоскопического эффекта. Оптическое программное обеспечение TracePro™ используется для моделирования освещённости, направления, равномерности и перекрёстных помех выходящего света. Показано, что предлагаемые нами СПП с V-образным вырезом и изогнутой микроструктурой обладают идеальной эффективностью с точки зрения угла ориентации, равномерности и перекрёстных помех выходящего света.

2. Структура устройства

На рис. 2а изображена структура модуля торцевой подсветки, включая СПП, световозвращающий лист, плоскость наблюдения и источники света слева и справа. Каждый источник света содержит двенадцать светодиодов, расположенных вдоль оси z. СПП изготовлена из полиметилметакрилата (ПММА); его показатель преломления составляет 1,49, площадь – 110 мм × 65 мм, а его толщина – 3 мм. В табл. 1 представлены характеристики светодиода Siemens LWT676. Поверхность световозвращающего листа – диффузно белого цвета. Плоскость наблюдения находится на 1 мм выше СПП

Рис. 1. Модуль торцевой подсветки в автостереоскопическом дисплее



¹ Перевод с англ. А.Ю. Басова

Таблица 1

Характеристики светодиода
Siemens LWT676

Характеристика	Значение
Световой поток, лм	0,05
Длина волны, мкм	0,5461
Угловое распределение	Ламбертовское
Количество лучей в файле	240000

и может определять распределение освещённости выходящего света.

Три типа микроструктур СПП сравниваются друг с другом (рис. 2б, в, г). Тип I имеет V-образную микроструктуру на нижней поверхности. Задавая медиану СПП в качестве плоскости симметрии, микроструктуры V-разреза описываются одномерным линейным уравнением в соответствии с предыдущим исследованием [20], как показано в (1).

$$S = aT - b, \quad (1)$$

где S – интервал с V-образным сечением, T – интервал без V-образного сечения; S и T являются параметрами регулировки. Интервал T необходим для равномерного распределения света по всей области СПП. Без интервала T световые лучи будут интенсивно распространяться в области вблизи источника света. Микроструктуры располагаются вдоль оси x , но в двух противоположных направлениях на нижней поверхности СПП. Как показано на рис. 2б, левая и правая половины СПП имеют микроструктуры, описываемые одномерными линейными уравнениями вдоль осей $+x$ и $-x$ соответственно. Каждое углубление V-образной микроструктуры имеет угол при вершине 55° и углы при основании 40° и 85° . Расстояние между высшими точками каждого углубления составляет $0,05$ мм.

СПП типа II имеет симметричную V-образную микроструктуру с фиксированным интервалом w , которая равномерно расположена на его нижней поверхности. Микроструктура создаётся двумя противоположно расположенными микроструктурами типа I, каждая шириной $0,10$ мм, как показано на рис. 2в.

Тип III сочетает в себе конструкцию типа II с другой микроструктурой,

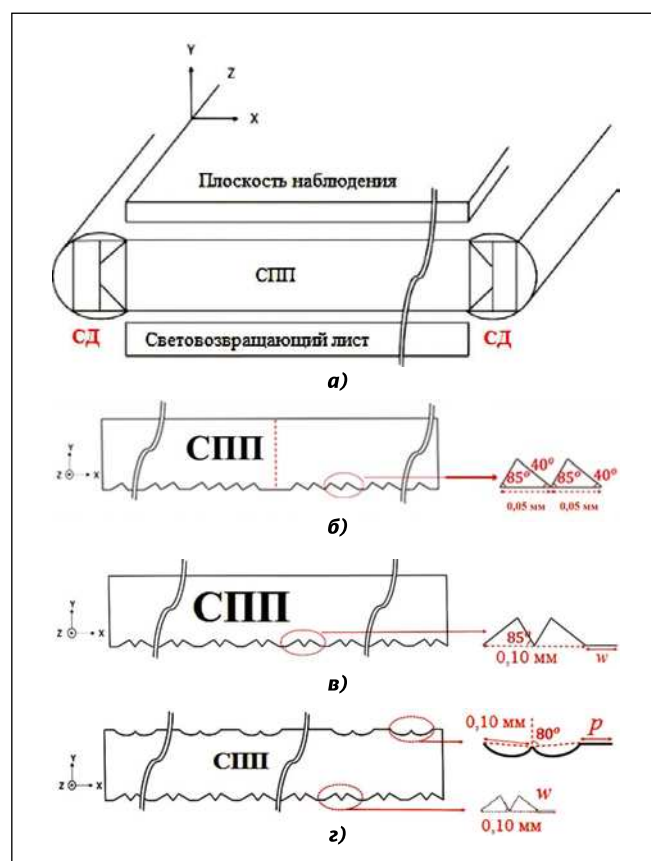


Рис. 2. а – Устройство модуля подсветки; б – Тип I; в – Тип II; г – Тип III

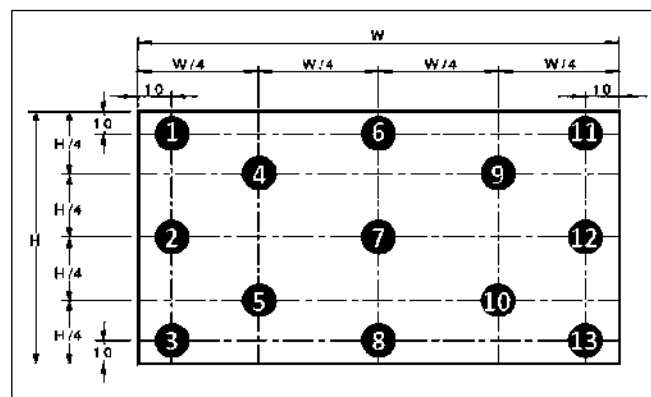


Рис. 3. Освещённость в 13 точках в плоскости наблюдения

рой, равномерно расположенной на верхней поверхности СПП. Эта другая микроструктура симметрично изогнута с фиксированным интервалом p . Изогнутая микроструктура состоит из двух круглых дуг, каждая шириной $0,10$ мм, а степень наклона каждой изогнутой поверхности составляет $\pm 10^\circ$, как показано на рис. 2 г.

Перекрыстные помехи (crosstalk) между правым и левым видами для центрального наблюдателя определяются следующим уравнением [14]:

$$crosstalk = \frac{1}{2} \left(\frac{I_L(\theta_R)}{I_R(\theta_R)} + \frac{I_R(\theta_L)}{I_L(\theta_L)} \right), \quad (2)$$

где I_R и I_L – измеренная максимальная интенсивность для правого и левого вида при углах наблюдения θ_R и θ_L соответственно. В этом эксперименте мы обнаружили, что соотношение утечки (leakage) к сигналу (signal) одинаково при 10° и -10° для левого и правого глаза. Определение перекрыстных помех присутствует в этом исследовании следующим образом [21]:

$$crosstalk = \frac{leakage}{signal} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Здесь утечка определяется как максимальная яркость света, который просачивается из незапланированного канала в планируемый, тогда как

СПП с V-образными микроструктурами на нижней поверхности

Тип	Равномерность, %	Направление излучения ¹⁾	Перекрёстные помехи, % ²⁾
Тип I, $S=T-10$ ($T \geq 13$)	10,3	-85° и 85°	
Тип II-1, $w=1,5$ мм	81,7	-10° и 10°	13,8 и 13,9
Тип II-2, $w=1,2$ мм	77,3	-10° и 10°	12,5 и 12,6
Тип II-3, $w=1,0$ мм	73,2	-10° и 10°	11,2 и 11,5
Тип II-4, $w=0,8$ мм	66,2	-9° и 9°	11,1 и 11,0
Тип II-5, $w=0,5$ мм	56,2	-9° и 9°	9,0 и 8,9

1) максимальный угол освещения для левого и правого источника

2) перекрёстные помехи в канале левого и правого глаза

сигнал определяется как максимальная яркость планируемого канала, который наблюдается под углом максимального излучения света. В этом исследовании мы стремимся уменьшить перекрёстные помехи. В канале для правого глаза отношение измеренной яркости правого источника света (утечки) к яркости левого источника света (сигнала) должно быть ниже. И наоборот, соотношение должно быть ниже и в левом канале.

В дополнение к проверке перекрёстных помех источника направленного света, равномерность принимается за величину для оценки производительности модуля торцевой подсветки на автостереоскопическом дисплее. На рис. 3 показана равномерность выходящего света. Отношение минимальной освещённости (E_{min}) к максимальной освещённости (E_{max}) в 13 точках на плоскости наблюдения может быть выражено уравнением:

$$Uniformity = \frac{E_{min}}{E_{max}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Эффективность оптического преобразования (η) выходящего света определяется как отношение освещённости в плоскости наблюдения (E_n) к освещённости, создаваемой источником света (E_u), и оценивается по формуле:

$$\eta = \frac{E_i}{E_e} \cdot 100\%. \quad (5)$$

3. Результаты и обсуждение

Шесть моделей СПП микроструктур сравниваются друг с другом с точки зрения равномерности, угла максимального излучения света и перекрёстных помех, как показано в табл. 2. Тип I СПП микроструктуры с V-образным вырезом на нижней поверхности описывается величинами $S = T-10$ ($T \geq 13$), с $a = 1$ и $b = 10$. Для СПП типа II-1, II-2, II-3, II-4 и II-5 w (интервал на нижней поверхности) установлен на 1,5 мм, 1,2 мм, 1,0 мм, 0,8 мм и 0,8 мм соответственно.

В результате измерения проводятся от левого и правого глаза зрителя перпендикулярно излучению света. Максимальное излучение света СПП типа I сосредоточено на стороне источника, а максимальные углы излучения света составляют 85° и -85° ; значения для СПП типа II-4 и типа II-5 составляют 9° и -9° , тогда как значения всех дру-

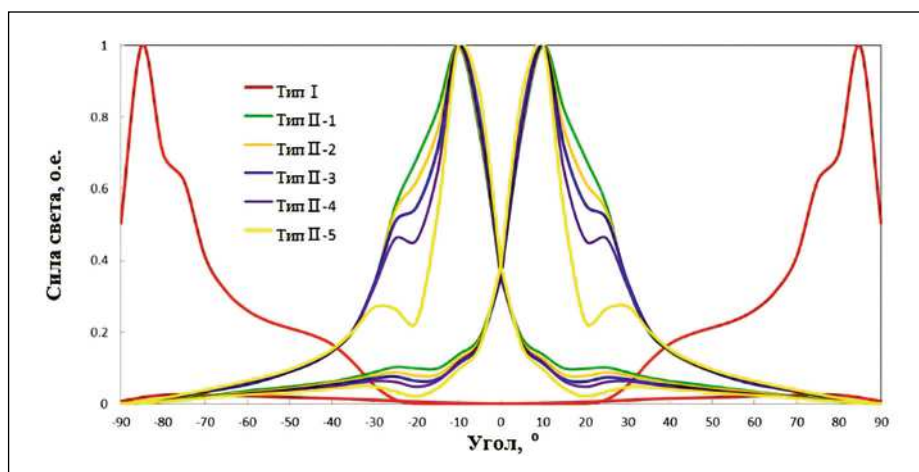


Рис. 4. График распределения силы света

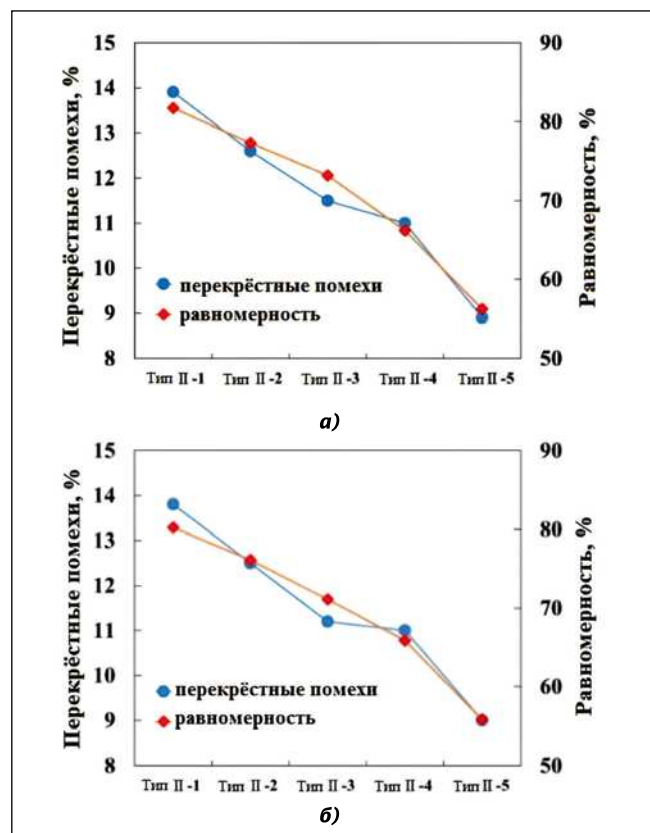
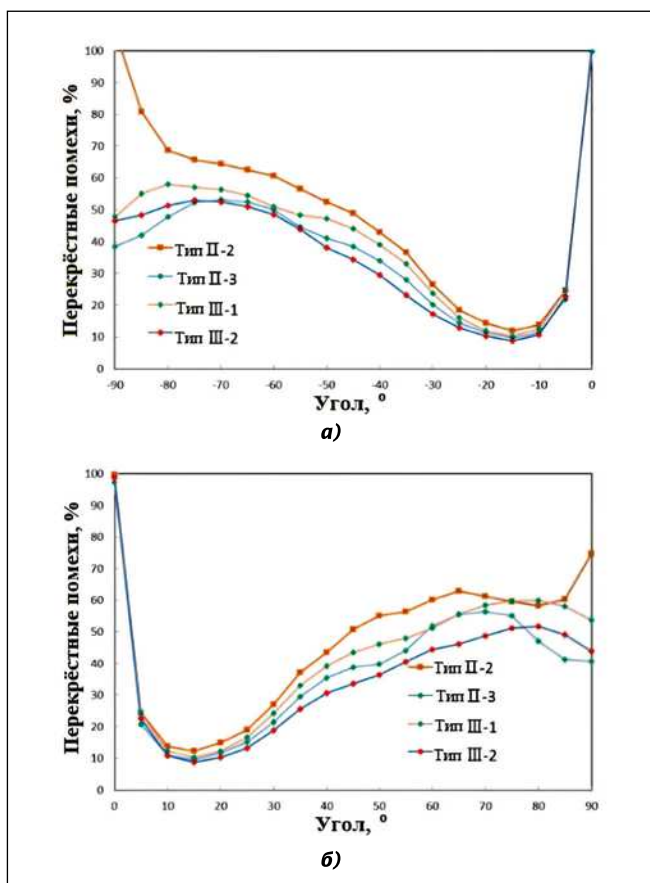


Рис. 5. Сравнение равномерности и перекрёстных помех:
а – левого источника света; б – правого источника света

Рис. 6. Перекрестные помехи: а – когда излучает правый источник света; б – когда излучает левый источник света



гих СПП составляют 10° и -10° . Эти результаты показывают, что максимальные углы излучения света в конструкциях типа II являются более подходящими, чем в конструкции типа I, для использования в модуле торцевой подсветки, как показано на рис. 4 и 5.

Сравнивая равномерность и перекрестные помехи на рис. 5, мы видим, что более низкие значения w дают более низкие перекрестные помехи и равномерность, тогда как более высокие значения дают более высокие перекрестные помехи и равномерность. Поскольку основные параметры для оценки производительности модулей торцевой подсветки для автостереоскопических дисплеев с временным мультиплексированием имеют более высокую равномерность, более низкие перекрестные помехи и максимальное излучение света, мы выбираем модели типа II-2 и II-3 для использования, поскольку их равномерность выше 70 %, перекрестные помехи составляют менее 13 %, а углы излучения света составляют 10° и -10° .

Чтобы уменьшить перекрестные помехи в каналах для левого и правого глаза, мы добавляем изогнутые микроструктуры на верхушках СПП типа II-2 и типа II-3, образуя конструкции типа III-1 и типа III-2 соответственно (рис. 2г). Изогнутые микроструктуры расположены симметрично с фиксированным интервалом $p = 1,1$ мм. Когда левый и правый источники активны, обнаруживаются результаты равномерности и эффективности оптического преобразования в плоскости наблюдения, а результаты перекрестных помех обнаруживаются при максимальных углах излучения света -10° и 10° , как обобщено в табл. 3.

Для диапазона углов наблюдения человеческого глаза от $\pm 7,5^\circ$ до $\pm 20^\circ$ мы отмечаем, что конструкция типа III-2 имеет наилучшее качество с точки зрения мультиплексированной по времени проекции в глаза для автостереоскопического дисплея и что эффективность оптического преобразования конструкций типа III-1 и типа III-2 выше, чем у типов III-2 и типа II-3. На рис. 6а, б показаны перекрестные помехи, обнаруженные на плоскости наблюдения, когда правый и левый источники излучают свет в левый и правый каналы соответственно. Карты освещенности конструкции типа III-2 показаны на рис. 7а, б. На рис. 8

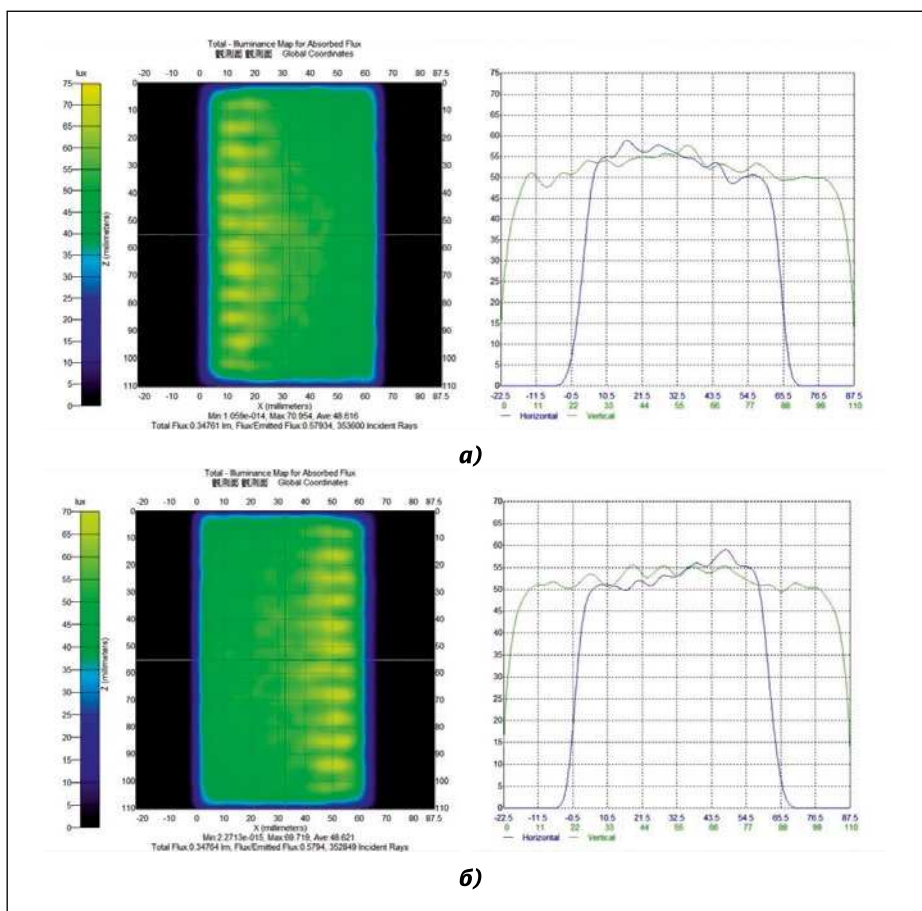


Рис. 7. Карта освещенности СПП типа III-2: а – равномерность 76,1 %, когда излучает левый источник света; б – равномерность 75,9 %, когда излучает правый источник света

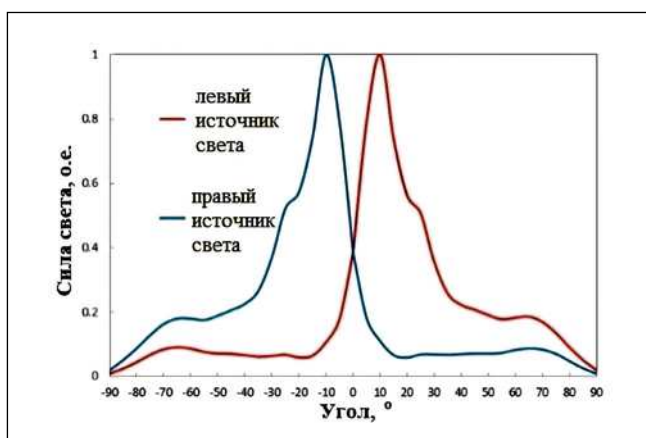
Равномерность, эффективность оптического преобразования и перекрёстные помехи

Тип	Фиксированные интервалы w и p	Равномерность, %	$\eta, \%^{3)}$		Перекрёстные помехи, % ⁴⁾	
II-2	$w = 1,2$ мм	77,3	49,7	49,9	12,5	12,0
II-3	$w = 1,0$ м	73,2	53,0	53,1	12,6	12,3
II-1	$w = 1,2$ мм, $p = 1,1$ мм	77,3	56,0	56,0	11,2	10,7
II-2	$w = 1.0$ мм, $p = 1,1$ мм	73,2	57,9	57,9	11,5	10,9

³⁾ эффективность оптического преобразования для левого и правого ИС

⁴⁾ перекрёстные помехи в канале левого и правого глаза

Рис. 8. График распределения силы света СПП типа III-2, когда излучают оба источника



кристаллы, параметры которых имеют упругие постоянные: $k_{11} = 16,7$ пН, $k_{22} = 1$ пН, $k_{33} = 18,1$ пН, $\Delta n = 0,083$ и $\Delta \varepsilon = -4,2$. Зазор жидкокристаллической ячейки составляет 10 мкм. Результаты моделирования приведены на рис. 10.

Сравнивая рис. 10 с рис. 9, мы находим почти одинаковые угол направления излучения света, равномерность освещения и устранение перекрёстных помех.

4. Заключение

Было отмечено, что конструкция СПП типа III-2 обеспечивает наибольшую яркость при $\pm 10^\circ$ для глаз человека. Эта конструкция демонстрирует среднюю равномерность выше 75 %, средний коэффициент перекрёстных помех ниже 10,8 % и эффективность оптического преобразования выше 57,9 %. Наши успешные результаты эффективно устраняют необходимость в призматической панели и удовлетворяют трём основным рабочим параметрам, включая направленный угол излучения света, равномерность освещения и устранение перекрёстных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yuukia A., Agaria M., Iwsakia N., Sasagawa T., Tahataa S., Satakea T., Murakamia O., Odaa K., Itob A., Miyakeb S. A new field sequential stereoscopic LCDs by use of dual-directional-backlight // Journal of Information Display.– 2004.– № 5. – С. 6–9.

2. Lee B. Three-dimensional displays, past and present // Phys. Today.– 2013.– № 66. – С. 36–41.

3. Xiao X., Javid B., Martinez-Corral M., Stern A. Advances in three-dimensional integral imaging: sensing, display, and applications // Appl. Opt.– 2013.– № 52. – С. 546–560.

представлен график распределения силы света для СПП типа III-2.

На рис. 9 показаны смоделированные с помощью жидкокристаллического программного обеспечения (LCD Master 2D) результаты для конструкции типа III-2. В качестве примера на рис. 1 мы моделируем параме-

тры освещения ячейки со скрученным нематиком. Мы установили толщину поляризатора 10 мкм и угол 45° , толщина анализатора 10 мкм и угол 135° на рис. 1, направления выравнивания верхней и нижней подложек параллельны поляризатору и анализатору соответственно. Добавлены жидкие

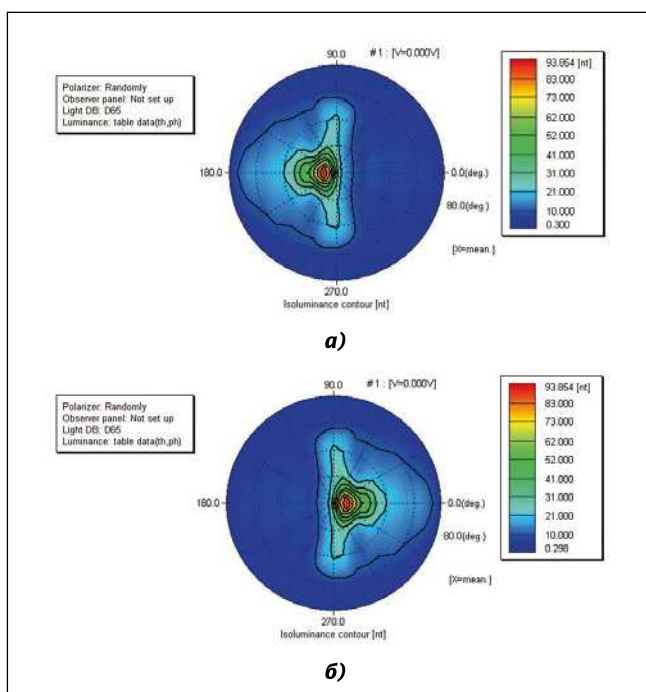
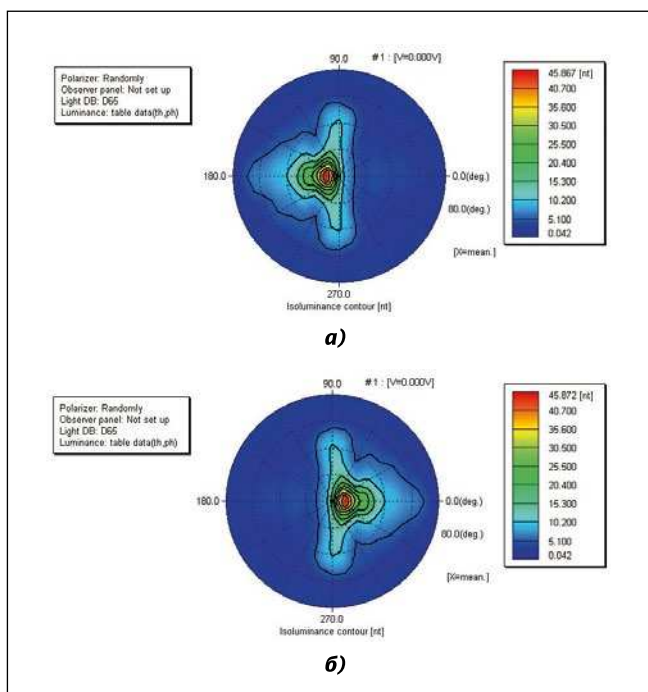


Рис. 9. Яркость, создаваемая:
а – правым источником света;
б – левым источником света

Рис. 10. Освещение жидкого кристалла: а – правым источником света; б – левым источником света



4. *Maphepo W., Huang Y.P., Shieh H.P.D.* Enhancing the brightness of parallax barrier based 3D flat panel mobile displays without compromising power consumption // *J. Disp. Technol.*– 2010. № 6. – С. 60–64.

5. *Chen C.H., Huang Y.P., Chuang S.C., Wu C.L., Shieh H.P., Mphpeö W., Hsieh C.T., Hsu S.C.* Liquid crystal panel for high efficiency barrier type autostereoscopic displays // *Appl. Opt.*– 2009.– № 48. – С. 3446–3454.

6. *Inoue Y., Sakamoto S., Takahashi K., Kanai C., Imai Y., Shimpuku Y.* A novel parallax liquid crystal barrier for temporally interlaced autostereoscopic 3D displays // *SID Digest.*– 2012.– № 43. – С. 221–224.

7. *Huang Y.P., Chen C.W., Shen T.C., Huang J.F.* Autostereoscopic 3D display with scanning multi-electrode driven liquid crystal (MeD-LC) lens // *J. 3D Res.*– 2010.– № 1. – С. 39–42.

8. *Chen C.W., Cho M., Huang Y.P., Javidi B.* Improved viewing zones for projection type integral imaging display using adaptive liquid crystal prism array // *J. Disp. Technol.*– 2014.– № 10. – С. 198–203.

9. *Lee B., Park J.H.* Overview of 3D/2D switchable liquid crystal display technologies // *Proc. SPIE7618, 761806.*– 2010.

10. *Huang Y.P., Liao L.Y., Chen C.W.* 2-D/3-D switchable autostereoscopic display with multi-electrically driven liquid-crystal (MeD-LC) lenses // *J. Soc. Inf. Disp.*– 2010.– № 18. – С. 642–646.

11. *Chang Y.C., Jen T.H., Ting C.H., Huang Y.P.* High-resistance liquid-crystal lens array for rotatable 2D/3D autostereoscopic display // *Opt. Express.*– 2014. № 22. – С. 2714–2724.

12. *Jen T.H., Chang Y.C., Ting C.H., Shieh H.P., Huang Y.P.* Locally controllable liquid crystal lens array for partially switchable

2D/3D display // *J. Disp. Technol.*– 2015.– № 11. – С. 839–844.

13. *Brott R., Schultz J.* Directional backlight guide considerations for full resolution autostereoscopic 3D displays // *SID Digest.*– 2010.– № 41. – С. 218–221.

14. *Ting C.H., Chang Y.C., Chen C.H., Huang Y.P., Tsai H.W.* Multi-user 3D film on a time-multiplexed side-emission backlight system // *Applied Optics.*– 2016.– № 55. – С. 7922–7928.

15. *Chien K.W., Shieh H.P.D.* Time-multiplexed three-dimensional displays based on directional backlights with fast-switching liquid-crystal displays // *Applied Optics.*– 2006.– № 45. – С. 3106–3110.

16. *Chen C.F., Kuo S.H.* A Highly Directional Light Guide Plate Based on V-grooves Microstructure Group // *Journal of Display Technology.*– 2014.– № 10. – С. 1030–1035.

17. *Chen J.W., Lee K.L., Wu J.J., Lin C.Y.* Design a backlight system to a LCD of vertical-field-switching bluephase // *Optik.*– 2014.– № 125. – С. 6713–6715.

18. *Lee K.L., He K.Y.* Effect of Micro-Structural Light Guide Plate on Source of Linearly Polarized Light // *Journal of Lightwave Technology.*– 2011.– № 29. – С. 3327–3330.

19. *Yan J.R., Wang Q.H., Li D.H., Zhang J.D.* Edge-Lighting Light Guide Plate Based on Micro-Prism for Liquid Crystal Display // *Journal of Display Technology.*– 2009.– № 5. – С. 355–357.

20. *Lin C.Y., Lee K.L., Tsai P.Y., Chen J.W.* Design of Directional Light Source for Blue Phase LCD // *Proc. SPIE9272, 927205.*– 2014.

21. *Woods A.J.* How are crosstalk and ghosting defined in the stereoscopic literature // *Proc. SPIE7863, 78630Z.*– 2011.



Шин-Мин Хун, магистр электротехники и информатики (Национальный Технологический Университет города Тайбэй), 2011.

В настоящее время занимается кандидатской диссертацией по электрооптической технике. Область научных интересов: проектирование торцевой подсветки, анализ тенденций отрасли, инновации в проектировании прототипов



Кинг Лиен-Ли, кандидат наук (Национальный Технологический Университет города Тайбэй), 1999.

Профессор электрооптической техники. Область научных интересов: система подсветки, анализ тенденций в отрасли, инновации в проектировании прототипов



Че-Ен Лин, магистр электрооптической техники (Национальный Технологический Университет города Тайбэй), 2015.

Область научных интересов: проектирование модуля подсветки и оптимизация устройства



Меи-Вен Чен, магистр электрооптической техники (Национальный Технологический Университет города Тайбэй), 2018.

Область научных интересов: проектирование модуля подсветки и оптимизация устройства



Джин-Джей Ву, кандидат наук в области электротехники (Национальный Университет Цзяотун), 1989.

Профессор электрооптической техники в Национальном Технологическом Университете города Тайбэй. Имеет более 20 лет опыта в улучшении жидкокристаллических дисплеев