

ОПТОЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. Е. Агабеков¹, А. А. Муравский¹, Turki S. Al-Saud², Soliman H. Al-Khowaiter²,
Н. С. Казак³, В. Н. Белый^{3*}, С. Н. Курилкина³, Н. А. Хило³

УДК 535.51

¹ Институт химии новых материалов НАН Беларуси,
220141, Минск, Беларусь; e-mail: ichnm@ichnm.basnet.by

² Центр Короля Абдулазиза по науке и технологиям, 11442, Эр-Рияд, Саудовская Аравия

³ Институт физики НАН Беларуси, 220072, Минск, Беларусь; e-mail: v.belyi@ifanbel.bas-net.by

(Поступила 25 июня 2020)

Предложен новый подход к разработке оптоэлектронного устройства для молекулярной ориентации функциональных материалов. Представлены результаты разработки его основных узлов — коллиматора излучения светодиода и широкополосного поляризатора с большой угловой апертурой. Рассмотрена проблема коллимации сильно расходящегося излучения светодиода. Показано, что для ее решения перспективно использование модифицированной конической линзы. На основе многослойной структуры разработан и изготовлен широкополосный поляризатор с большой угловой апертурой, который является важным элементом оптоэлектронного устройства.

Ключевые слова: оптоэлектронное устройство, оптическое излучение, коллимация излучения, поляризатор, молекулярная ориентация функциональных материалов.

A new approach to the development of an optoelectronic device for molecular orientation of functional materials is proposed. The results of the development of its main components – a collimator of led radiation and a broadband polarizer with a large angular aperture are presented. The problem of collimation of strongly divergent led radiation is considered. It is shown that the use of a modified conical lens is promising for the problem solution. The broadband polarizer with a large angular aperture, which is an important element of the optical-electronic device, has been designed and manufactured on the basis of a multi-layered structure.

Keywords: optoelectronic device, optical radiation, collimation of radiation, polarizer, molecular orientation of functional materials.

Введение. Ориентация органических молекул — современная технология для применения в органических электронных устройствах. Ряд методов молекулярной ориентации, основанных на упорядочении жидкокристаллической фазы материалов, доказали свою перспективность в органических полевых транзисторах и органических светоизлучающих диодах (СИД). В настоящей работе предложен метод молекулярной ориентации обратимых межмолекулярных связей в новых функциональных материалах, поляризованных светом.

Для формирования фотоориентированных слоев с заданными свойствами требуется оптоэлектронное устройство, которое позволяет управлять параметрами светового излучения (длиной волны, поперечным размером и поляризацией светового пучка). Его создание предполагает использование

OPTICAL-ELECTRONIC DEVICE FOR MOLECULAR ORIENTATION OF FUNCTIONAL MATERIALS

V. E. Agabekov¹, A. A. Muravsky¹, Turki S. Al-Saud², Soliman H. Al-Khowaiter², N. S. Kazak³,
V. N. Belyi^{3*}, S. N. Kurilkina³, N. A. Khilo³ (¹Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220141, Belarus; e-mail: ichnm@ichnm.basnet.by; ²King Abdulaziz City for Science and Technology, Riyadh, 11442, Saudi Arabia; ³B. I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220072, Belarus; e-mail: v.belyi@ifanbel.bas-net.by)

СИД, поскольку они компактны, недороги, надежны, имеют низкое рабочее напряжение и малое время выключения/включения. Оптическое излучение СИД имеет узкую спектральную полосу и допускает управление яркостью излучения (диммирование) в широких пределах. СИД также демонстрируют большую цветовую гамму, что делает их оптимальными источниками света для компактных проекторов [1, 2].

Для эффективного использования оптоэлектронного устройства в целях молекулярной ориентации необходимо решить ряд проблем, в частности обеспечить достаточную степень коллимации светового пучка и его последующую поляризацию. При этом для сохранения высокой световой эффективности СИД важно минимизировать световые потери как в коллиматоре, так и в поляризаторе.

К настоящему времени предложен ряд методов коллимации излучения СИД (см., например, [3—10]). Особенность известных коллиматоров — их сложный, многоступенчатый характер. Первая ступень коллимации реализуется обычно с применением сферических или конических отражателей, или слоя герметика, форма которого близка к сферической. В итоге такие отражатели оказывают влияние на световой поток подобно действию линз [3, 4]. Вторая ступень коллимации реализуется с помощью специально сконструированных оптических элементов. Примером таких элементов, широко используемых в настоящее время, являются так называемые TIR-линзы, которые повышают степень коллимации пучка за счет эффекта полного внутреннего отражения [5—7]. Второй пример — конусообразные световоды [3, 8, 9], концентрирующие излучение и адаптирующие диаграмму направленности излучателя в соответствии с апертурой приемного устройства. В [8] представлена компактная система на основе подобного световода с прямоугольным поперечным профилем, на выходе которого формируется равномерно освещенный прямоугольный пучок. При этом потери излучения в системе не превышают ~19 %. Недостатком конусообразных световодов является зависимость их длины от требуемой расходимости на выходе. Если расходимость должна быть малой, то длина световода оказывается весьма большой.

Кроме уменьшения потерь в устройствах коллимации и концентрации СИД-излучения актуальна задача минимизации потерь в последующем устройстве поляризации излучения, а также на стыке коллиматора и поляризатора.

Цель настоящей работы — создание компактной и эффективной системы коллимации и поляризации излучения СИД на различных длинах волн (450, 550 и 650 нм, что соответствует так называемому RGB-типу фотоориентации).

Исследование диаграммы направленности светодиодов. В первую очередь следует проанализировать угловое распределение интенсивности излучения СИД, что необходимо для определения параметров коллиматора. Для этого использован известный метод, который состоит в измерениях поперечных распределений световой интенсивности света на нескольких заданных расстояниях от излучателя.

Угловая расходимость (угол расходимости по отношению к оптической оси) рассчитывается по формуле $\gamma = \text{tg}^{-1}(\Delta d/2L)$, где Δd — изменение диаметра пучка на расстоянии L . Для измерения расходимости на заданных расстояниях размещался полупрозрачный рассеивающий экран и рассеянный экраном в прямом направлении свет фотографировался цифровой камерой.

Исследовались СИД в синей и красной областях спектра. На рис. 1, *a—d* показано измеренное поперечное распределение интенсивности на расстояниях 10 и 20 см для синего СИД марки LED 365-1184-ND-X с параметрами: центральная длина волны излучения $\lambda = 465$ нм, ширина линии $\Delta\lambda = 20$ —25 нм, мощность $P = 12.5$ мВт, рабочий ток 20 мА, напряжение питания 3.4 В. Как видно из рис. 1, *a—z*, поперечное распределение имеет значительную неоднородность. При этом характеристикой неоднородности является ее двухкомпонентность, т. е. наличие достаточно четко выраженных приосевой и кольцевой компонент. Для количественного описания полей такого типа использованы три параметра: d_1 — ширина осевого пучка по уровню e^{-2} (или FWHM-параметр), диаметры d_2 и d_3 , соответствующие кольцевым максимуму и минимуму интенсивности. Необходимость в таком описании отражает тот факт, что поля СИД имеют более сложную структуру, чем пучки гауссова типа (один параметр) или бессель-гауссовы пучки (два параметра). Результаты измерений указанных диаметров представлены в табл. 1. По приведенной выше формуле рассчитана локальная угловая расходимость (локальный угол конуса) пучка в соответствующих его частях, т. е. в области центрального максимума, кольцевого максимума и в переходной области: $\gamma_1 = 21.6^\circ$; $\gamma_2 = 12^\circ$; $\gamma_3 = 7^\circ$.

Т а б л и ц а 1. Результаты измерения структуры светового пучка, формируемого светодиодом

z , см	d_1 , см	d_2 , см	d_3 , см
10	5.1	1.9	1.3
20	8.2	3.8	2.6
30	11.9	5.9	3.7

Следствием различия угловой расходимости в областях 1—3 является неустойчивость двухкомпонентной структуры светового поля по мере его распространения. Из рис. 1, δ видно, что в дальней зоне ($z = 30$ см) угловое распределение интенсивности однокольцевое, его расходимость $\gamma_0 \approx \gamma_2$, т. е. $\sim 12^\circ$.

Аналогичные эксперименты проведены для ряда СИД, излучающих в красной области (рис. 1, e — $л$). Результаты подтверждают наличие двухкомпонентной структуры ближнего поля и у данных СИД, т. е. одна компонента соответствует части пучка вблизи его оси, другая — кольцевому пучку.

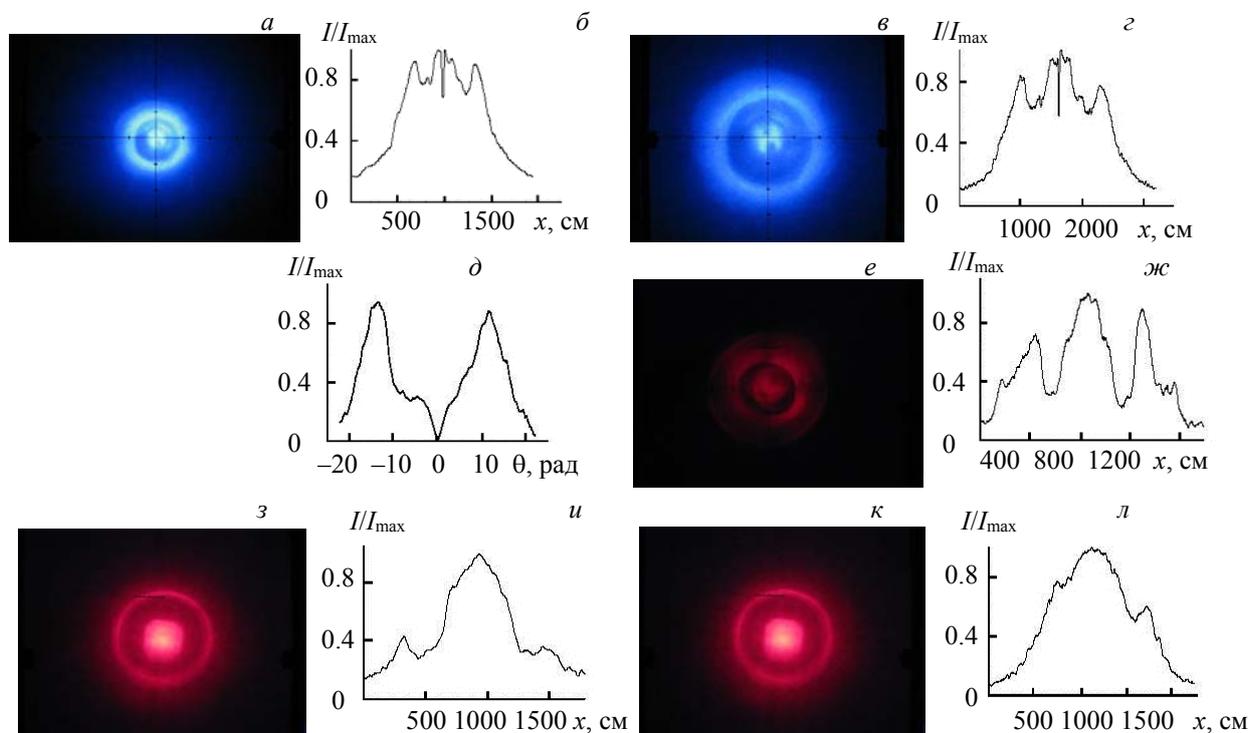


Рис. 1. Поперечные распределения интенсивности излучения: светодиода LED 365-1184-ND-X на расстояниях $z = 10$ (a , b), 20 ($в$, $з$), 30 см ($д$), а также светодиодов типов 75-014-89 (e , $ж$), 75-036-42 ($з$, $и$) и 404-1102-ND ($к$, $л$) на расстоянии $z = 20$ см

Механизм формирования двухкомпонентного поля можно объяснить следующим образом (рис. 2). Излучение из активной области СИД распространяется исходно преимущественно горизонтально в направлении квазипараболического отражающего зеркала. Это зеркало отражает излучение вверх и формирует мнимое изображение излучающей поверхности СИД, имеющее кольцевой профиль. Излучение от этого мнимого источника далее трансформируется верхней частью капсулы, которая в первом приближении представляет собой сферическую линзу. Как известно, если перед линзой вблизи ее фокальной плоскости располагается кольцевое поле, то такая схема формирует коллимированный конический пучок. В реальной конструкции СИД имеется отстройка от фокуса и присутствуют aberrации зеркала и линзы. Поэтому конический пучок приобретает значительную расходимость (рис. 2), что и показали измерения. Тем не менее конический пучок в дальней зоне неизбежно формирует однокольцевое поле, уширенное из-за расходимости. В ближней зоне самоперекрывание конического пучка способствует формированию максимума в осевой области. Если бы этот кониче-

ский пучок был пространственно когерентным, то в центральной его части формировался бы известный пучок Бесселя.

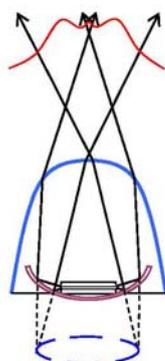


Рис. 2. Модель, описывающая экспериментально измеренные профили распределения интенсивности излучения СИД

Использование усеченного аксикона для уменьшения расходимости излучения СИД. Наличие двухкомпонентной структуры поля, формируемого светодиодом, определило выбор оптического элемента, предложенного для уменьшения угловой расходимости излучения СИД. Этот оптический элемент представляет собой усеченный рефракционный аксикон, характеризуемый диаметрами верхнего и нижнего основания и высотой или углом при основании (рис. 3).

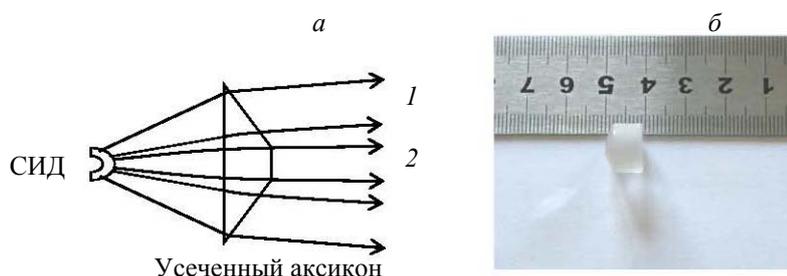


Рис. 3. Уменьшение расходимости конического поля, формируемого светодиодом, с помощью усеченного аксикона (а); лучи (1) направлены на коническую поверхность аксикона и преломляются ей в направлении оптической оси; приосевые лучи (2) направлены на усеченную поверхность аксикона, части не изменяют своего направления; внешний вид изготовленного усеченного конуса (б)

Параметры усеченного аксикона подбирались таким образом, чтобы обеспечить максимальную коллимацию излучения СИД в красной и синей областях спектра.

Из геометрической оптики следует выражение для угла, образуемого лучом (1) на выходе аксикона с оптической осью системы:

$$\alpha_{\text{out}} = \sin^{-1}[n \sin(\theta - \alpha_1(\alpha_{\text{in}}))] - \theta, \quad (1)$$

где θ — угол при основании аксикона; $\alpha_1(\alpha_{\text{in}}) = \sin^{-1}(\sin(\alpha_{\text{in}})/n)$; α_{in} — угол падения луча на аксикон; n — показатель преломления материала аксикона. На рис. 4 приведена рассчитанная с помощью (1) зависимость угловой расходимости излучения от угла падения α_{in} на аксикон. Угол при основании конической линзы θ выбран из условия, что излучение с максимальной мощностью (лучи сконцентрированы вблизи максимума, соответствующего γ_2) распространяется за конусом параллельно оптической оси. Как видно из рис. 4, при падении лучей (1) на коническую поверхность под углом в диапазоне $\alpha_{\text{in}} = 6^\circ\text{—}18^\circ$ угол их отклонения на выходе из аксикона расположен в диапазоне $\alpha_{\text{out}} = -6^\circ\div 6^\circ$. Следовательно, падающая на усеченный аксикон компонента светового пучка, угловая

расходимость которой 18° ($\sim 95\%$ энергии, излучаемой СИД), имеет расходимость на выходе $\leq 6^\circ$. Это указывает на возможность достижения достаточно высокой эффективности коллимации излучения СИД с помощью относительно простого оптического элемента.

В соответствии с расчетами изготовлен и экспериментально исследован коллиматор излучения СИД на основе усеченного аксикона, выполненного из стекла ВК7 с углом при основании $\sim 22^\circ$, диаметром основания 1.9 см и высотой 0.9 см (рис. 3, б). Эффект от применения такого коллиматора к излучению синего СИД показан на рис. 5. Видно, что использование коллиматора позволяет трансформировать двухкомпонентную структуру поля СИД в однокомпонентное поле осевого типа и более чем в два раза уменьшить расходимость пучка (от 40 до 15°).

Коллимация излучения СИД важна тем, что позволяет осуществлять более острую линзовую фокусировку энергии поля. На рис. 5, д, е показана фокусировка данного пучка линзой с фокусным расстоянием 3 см. Как видно, диаметр пучка уменьшается до 5 мм и его дальнейшее уменьшение может быть достигнуто при использовании более сложной системы линз.

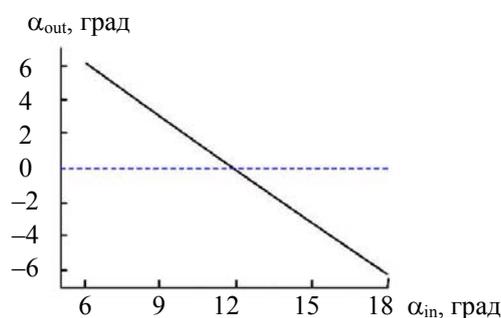


Рис. 4. Зависимость угла расходимости выходящего из усеченного конуса излучения от угла падения; угол при основании конуса, выполненного из оптического стекла ВК7, 21.7°

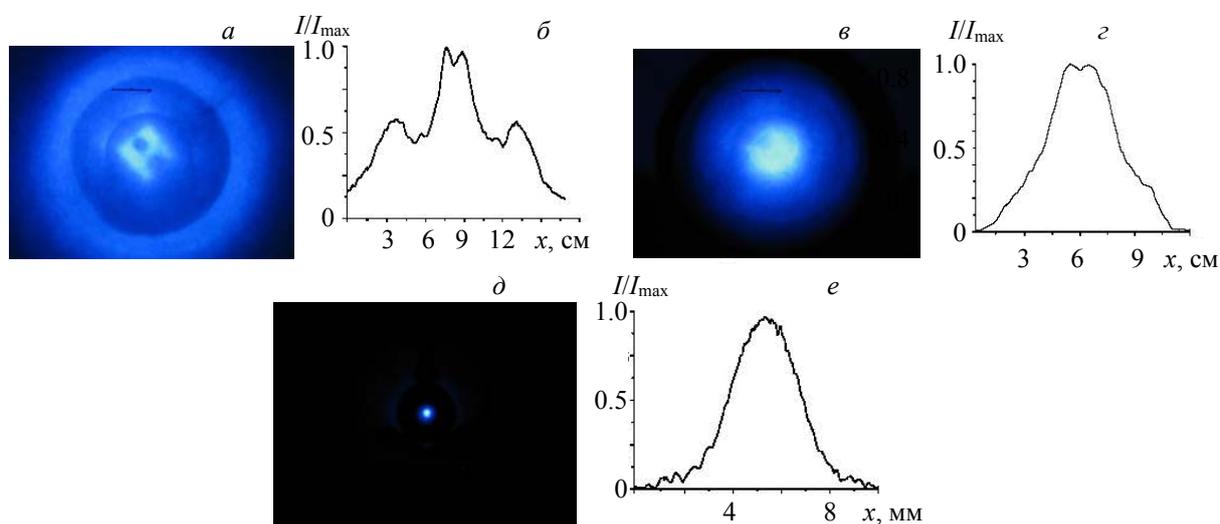


Рис. 5. Световой пучок, излучаемый светодиодом 365-1184-ND на расстоянии 25 см без коллиматора (а, б) и с коллиматором, расположенным на расстоянии 10 см от СИД (в, г), а также фокусировка пучка линзой с фокусным расстоянием 3 см (д, е)

Широкоапертурный и широкополосный поляризатор. Еще один важный элемент оптоэлектронного устройства — широкополосный поляризатор с большой угловой апертурой. Принцип его работы основан на использовании одномерных фотонных кристаллов (ФК) — искусственных периодических структур, размер элементарной ячейки которых сопоставим с длиной световой волны. Их особенностью является наличие фотонных запрещенных зон — спектральных областей непропускания, что обуславливает возможность применения ФК для преобразования поляризации света [10—12]. Пре-

имуществами поляризаторов на основе ФК являются низкие потери, а также возможность функционирования в широком частотном диапазоне.

Разработан высокоэффективный поляризатор (рис. 6, *a*, *б*), основанный на использовании поляризующих свойств ФК, образованного диэлектрическими слоями с низким (SiO_2 , $n = 1.45$) и высоким (Nb_2O_5 , $n = 2.25$) показателями преломления. Выбранные для поляризатора материалы недорогие, технологичные, прозрачные в оптическом диапазоне, имеют высокий порог лазерного пробоя. ФК включает в себя две периодические подструктуры с разными периодами. Первая содержит пять элементарных ячеек, в каждой из которых имеются слои Nb_2O_5 и SiO_2 толщинами 83 и 126 нм. Вторая также включает в себя пять элементарных ячеек, содержащих слои Nb_2O_5 и SiO_2 , но толщина этих пленок 107 и 165 нм. Оптимизация параметров ФК выполнена с использованием программного обеспечения Thin Film Design TFCalc-3.5.

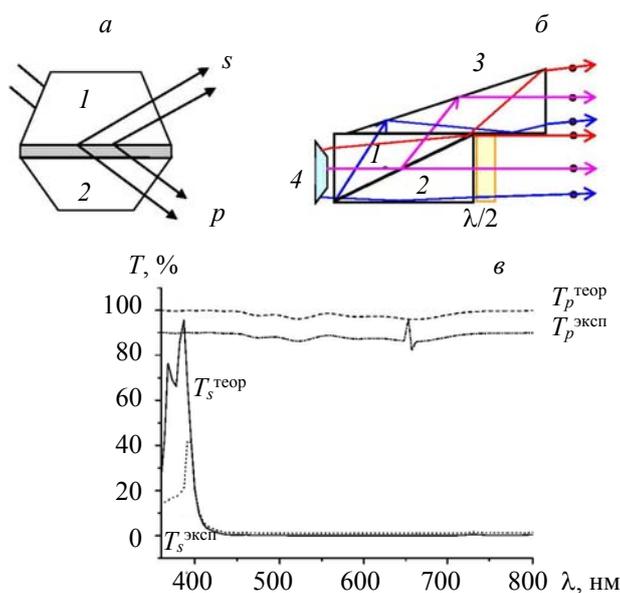


Рис. 6. Варианты оптической схемы поляризатора излучения светодиода (*a*, *б*), результаты теоретического и экспериментального исследований (*в*) энергетического коэффициента пропускания (T) s - и p -поляризованных пучков на выходе поляризатора (*б*); поляризованные s - и p -пучки распространяются в различных направлениях (*a*) и параллельно (*б*); 1, 2 — призмы из оптического стекла, между которыми содержится фотоннокристаллическая структура; 3 — призма полного внутреннего отражения; 4 — усеченный аксикон

Угол падения β светового пучка на входную поверхность ФК удовлетворяет условию Брюстера $\text{tg}\beta = n_{\text{Nb}_2\text{O}_5} / n_{\text{glass}}$, где n_{glass} — показатель преломления материала призмы. При использовании в качестве материала призмы стекла ВК7 угол падения $\beta = 56^\circ$. В этом случае отраженный свет содержит только s -поляризованную компоненту, в то время как p -поляризованная компонента проходит во вторую призму. Для схемы, представленной на рис. 6, *a*, падающее поле разделяется на ортогонально поляризованные световые пучки, распространяющиеся в различных направлениях. Использование модифицированной схемы (рис. 6, *б*) позволяет получить полностью p -поляризованное излучение. В этом случае поляризатор помещен непосредственно за усеченным аксиконом. Призма полного внутреннего отражения 3 поворачивает s -поляризованную компоненту в направлении, параллельном оптической оси. Полуволновая пластинка $\lambda/2$ позволяет создать одинаковое состояние поляризации по всему сечению выходящего пучка. При выборе оптимальных параметров данный поляризатор позволяет достигать больших коэффициентов экстинкции (отношения энергетических коэффициентов пропускания p - и s -компонент) в широком диапазоне 400—800 нм, что теоретически доказано и экспериментально апробировано (рис. 6, *в*).

Заключение. Предложен новый подход к ориентации обратимых межмолекулярных связей в новых функциональных материалах поляризованным светом, основанный на использовании поляризованного излучения RGB-линейки светодиодов. Предлагается использовать оптоэлектронное устройство, основными элементами которого является коллиматор излучения светоизлучающего диода и широкополосный широкоапертурный поляризатор.

Экспериментально обнаружена двухкомпонентная структура углового спектра светодиодного излучения, включающая в себя высокоэнергетические осевую и коническую компоненты. Установлено, что двухкомпонентная структура обусловлена особенностями капсулирования активного элемента светодиода, и с учетом этого предложен простой и компактный оптический элемент для коллимации излучения, представляющий собой усеченный аксикон. Действие усеченного аксикона продемонстрировано для светодиодов, излучающих в синей и красной областях спектра, для которых достигнуто уменьшение расходимости излучения в три раза. При дальнейшем использовании фокусирующей линзы получен световой пучок с поперечным размером ~5 мм. При разработке RGB-линейки светодиодов необходимо использовать три усеченных аксикона, каждый из которых оптимизирован для светодиодов, излучающих в красной, зеленой и синей областях спектра соответственно.

Разработан и изготовлен широкополосный поляризатор с большой угловой апертурой. Эксперименты показывают, что в диапазоне 400—750 нм коэффициент экстинкции поляризатора составляет ~0.95 при угловой апертуре ~12°, что соответствует угловой расходимости поля, формируемого коллиматором.

На основе модифицированной конической линзы (усеченного аксикона) и широкополосного поляризатора с большой угловой апертурой создан прототип оптоэлектронного устройства с использованием RGB-светодиодов для фотоориентации межмолекулярных связей в новых функциональных материалах, которые могут рассматриваться как электронная бумага [13].

[1] **E. F. Schubert, J. K. Kim.** *Science*, **308** (2005) 1274—1278

[2] **A. Zukauskas, M. S. Schur, R. Gaska.** *Introduction to Solid State Lighting*, Wiley-Interscience, New York (2002)

[3] **I. Moreno.** *Proc. Int. Optical Design Conference*, paper TuD6 (2006), doi: 10.1364/IODC.2006.TuD6.

[4] **Yu Xing-Jie, Y. L. Ho, L. Tan, Ho-Chi Huang, Hoi-Sing Kwok.** *J. Display Technol.*, **3** (2007) 295—303

[5] **M. H. Keuper, S. Paolini, G. Harbers, P. Tsang.** *SID*, **03** (2003) 713—715

[6] **Joo Jae Young, Kang Chang Seog, Park Soon Sub, Lee Sun-Kyu.** *Opt. Express*, **17** (2009) 23449—23458

[7] Technical Data Sheet for the range of Collimator lenses used with the Lumileds 1-watt Luxeon Emitters, www.roithner-laser.com/datasheets/led_optics/LED_optics.pdf

[8] **H. Murat, A. Gielen, H. De Smet.** *J. Soc. Inf. Disp.*, **15** (2007) 519—526

[9] **Bart Van Giel, Youri Meuret, Hugo Thienpont.** *Proc. SPIE*, **6196** (2006) 619603

[10] **J. C. Monga.** *J. Mod. Opt.*, **36** (1989) 769—784

[11] **S. K. Awasthi, S. P. Ojha.** *PIER*, **88** (2008) 321—335

[12] **M. Thomsen, Z. L. Wu.** *Appl. Opt.*, **36** (1997) 307—313

[13] **T. S. M. Al-Saud, R. M. Altamimi, V. E. Agabekov, A. A. Muravsky, N. S. Kazak, V. N. Belyi, N. A. Khilo, A. I. Mitskovets, S. N. Kurilkina, A. A. Ryzhevich.** *Light Pen. US Patent 9476569 B2*, date of issue 25 October 2016 (2016)