

## РАСЧЕТ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДЛЯ РАВНОМЕРНОГО ВЫВОДА СВЕТА ИЗ ПЛАНАРНОГО ТОНКОГО ВОЛНОВОДА

В.В. Котляр<sup>1</sup>, А.Г. Налимов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия,

<sup>2</sup> Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

### Аннотация

Рассмотрен метод решения задачи вывода света из подсветки ЖК дисплея, работающей от одного светодиода, в приближении тонкого волновода. Внимание уделено двум способам расчета: с кусочно-постоянной плотностью расположения микроструктур на волноводе и расчетным положением каждой микроструктуры. Результаты расчетов промоделированы методом трассировки лучей Монте-Карло.

**Ключевые слова:** волновод, система подсветки, дисплей.

### Введение

Технологии создания мобильных телефонов существенно продвинулись за последние несколько лет. Эти технологии должны совершенствоваться, чтобы удовлетворять требованиям высокого качества изображения и улучшенной портативности за счет применения небольших и легких компонентов. В частности, важную роль играют системы подсветки ЖК экрана как для качества изображения, так и для механических свойств экрана в целом [1-8].

Поскольку обычные ЖК экраны имеют систему подсветки (1-2 мм толщиной), за исключением работы в отраженном свете, они относительно тяжелые и толстые. Однако некоторые группы исследователей изучают и предлагают новые типы подсветок экрана [9-15]. ЖК экраны с подложкой из прозрачной пластиковой пленки удобны в создании современных дисплеев с хорошей гибкостью и высокими оптическими характеристиками в отличие от стеклянной подложки [16-17].

Для достижения требуемого качества изображения основные усилия направлены на создание системы подсветки экрана с высокой яркостью. Таким образом, актуальной задачей является расчет коллимированного вывода света из плоского тонкого волновода с максимальной эффективностью.

В [5] рассмотрен расчет расстановки микропризм для вывода света, однако LED поставлен в угол волновода, что увеличивает площадь подсветки в приборе и увеличивает конечное изделие. В [18] предлагается производить вывод света через окна прилегаемого к волноводу второго слоя. При приемлемой равномерности выводимого излучения это увеличит толщину световода в целом, а также данная конструкция должна быть лучше защищена от механических воздействий.

В данной работе предлагается метод решения задачи вывода света из подсветки ЖК дисплея, работающей от одного светодиода, в приближении тонкого волновода. Рассмотрены два способа расчета: с кусочно-постоянной плотностью расположения микроструктур на волноводе и расчетным положением каждой микроструктуры. Последний способ сложнее в расчете и производстве, но позволяет в

лучшей мере получить требуемую равномерность выводимого излучения для тонкого волновода, где применима лучевая теория распространения света (толщина волновода много больше средней длины волны света LED).

### 1. Описание методов расчета волновода-подсветки

Рассмотрим методы расчета плотности расстановки призм для вывода света из волновода в приближении тонкого волновода. Данное приближение исключает такие явления, как неравномерное уменьшение интенсивности света в разных слоях волновода при его выводе, учет среднего угла распространения света в волноводе при расстановке микроструктур для вывода света, неравномерное уменьшение интенсивности отдельных длин волн в белом свете и т.д. Микроструктурами для вывода света могут быть любые рефракционные структуры, например, микропризмы или их комбинации, протравленные канавки, нанесенный на одну из поверхностей волновода рельеф.

Для начала рассмотрим простейший способ расчета плотности расстановки призм, основанный на кусочно-постоянных областях плотности призм при выводе света от одного LED.

Пусть в волновод излучается энергия  $I_0$ . Диаграмма направленности LED является ламбертовской (косинусоидальной), поэтому для упрощения расчета расположения микроструктур для вывода света из волновода целесообразно разбить весь планарный волновод на сектора и считать плотность потока света в каждом из них постоянной. Разобьем всю поверхность одного сектора волновода на  $N$  элементарных площадок  $dS$  (рис. 1). На рис. 1 показан сектор волновода толщиной  $h$ , длиной  $L_{\max}$ , угол сектора в плоскости XZ принят  $\alpha_{\max}$ .

Пусть функция вывода света из волновода  $K_f(L)$  определяет долю световой энергии, подлежащую выведению на расстоянии  $L$  с элементарной площади  $dS(L)$ . Предположим, что интенсивность распространяющегося света в секторе по азимутальному углу  $\alpha$  не меняется. Равномерный вывод света

из волновода предполагает постоянную интенсивность выводимого света по максимально возможной площади волновода. Таким образом, с ростом расстояния  $L$  от LED количество энергии света  $K_f(L)$ ,

выведенное из волновода на расстоянии  $L$  с площадки  $dS$ , должно расти пропорционально  $L$ :

$$K_f(L) = cL. \tag{1}$$

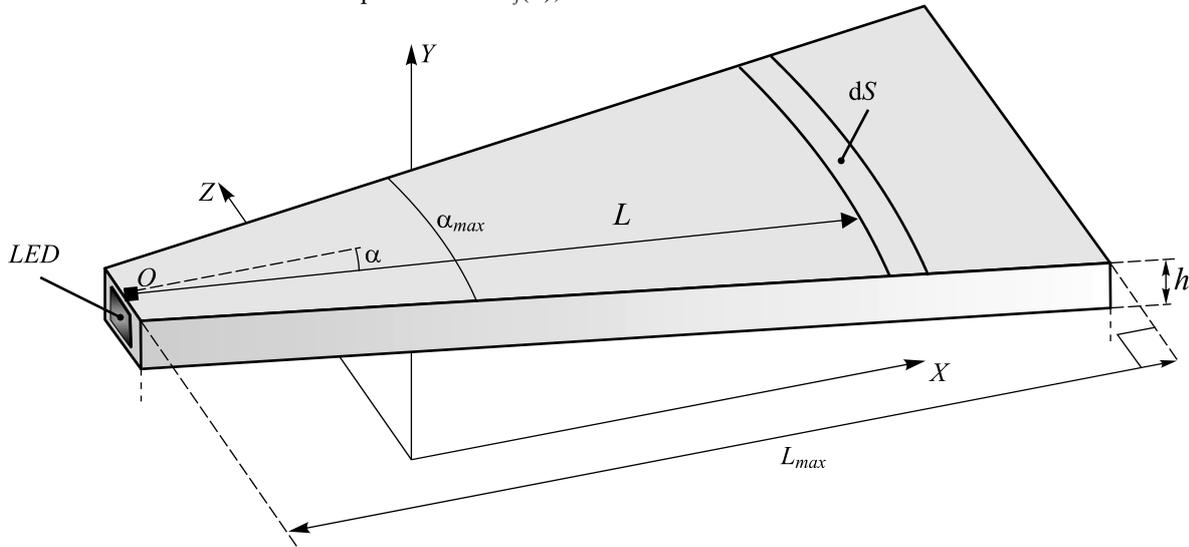


Рис. 1. Схема рассматриваемой задачи: свет вводится в волновод вдоль оси X, а выводится - вдоль оси Y. Волновод лежит в плоскости XZ

Обозначим  $I_{lost}$  остаточную световую энергию на выходе всего волновода. Тогда доля выводимого света на всем секторе  $P = \frac{I_0 - I_{lost}}{I_0}$ . Таким образом, на функцию выведения света  $K_f(L)$  действует условие:

$c \sum_{L=1}^{L_N} L = PI_0$ , где  $N$  – число расстояний, на которые устанавливаем микроструктуры на секторе волновода (дискретизация координат микроструктур по оси распространения света X).

Отсюда найдем коэффициент  $c = \frac{PI_0}{\sum_{L=1}^{L_N} L}$ . Задав-

шись функцией выведения света  $K_f(L)$ , можно рассчитать расположение микроструктур, которые необходимы для вывода света.

Пусть одна микроструктура выводит долю  $k_1$  от всего света, проходящего через нее в волноводе:  $I_{out1} = k_1 I_1$ , где  $I_{out1}$  - интенсивность света, выведенная данной микроструктурой,  $I_1$  - суммарная энергия распространяющегося в волноводе света на поперечном срезе непосредственно перед микроструктурой. Тогда в площадке волновода  $dS(L)$  нужно поставить столько микроструктур, чтобы они выводили из волновода световую энергию, равную  $\frac{K_f(L)}{k_1}$ .

Общая расстановка микроструктур производится так, чтобы свет равномерно выводился при всех углах распространения света  $\alpha$ . При необходимости

могут быть введены и другие структуры для вывода света, с другим коэффициентом  $k_1$ , расчеты производятся аналогично.

Второй способ расстановки микроструктур основан на расчете расстояния между каждой парой микроструктур из условий равномерности выводимого излучения.

Пусть одна микроструктура выводит долю  $k_1$  от полной энергии света, аналогично предыдущему случаю. В таком случае, на интервале  $L_1 < L < L_2$  вдоль луча необходимо вывести следующее количество света:

$$\sum_{L_1 \leq L < L_2} cL \approx k_1 I_1, \tag{2}$$

где  $L_2 = L_1 + n\Delta L$ ,  $\Delta L$  - минимальный технологически возможный шаг между двумя позициями расположения микроструктур,  $n$  определяет интервал между позициями  $L_1$  и  $L_2$ .

Зная величины  $c$ ,  $k_1$ ,  $I_1$  на расстоянии  $L_1$ , трудно рассчитать позицию  $L_2$ :

$$L_2 = L_1 + n\Delta L \approx 3L_1 + \sqrt{4L_1^2 - 2\frac{k_1 I_1}{c}}. \tag{3}$$

На следующем шаге из значения  $I_1$  вычитается значение энергии, выведенной на предыдущем шаге, и операция вычисления позиции  $L_3$  проводится аналогично позиции  $L_2$ .

### 2. Результаты моделирования: сравнение методов расчета

В качестве величины неравномерности вывода света из планарного волновода примем:

$$\sigma = \frac{I_{c\max} - I_{c\min}}{I_{c\max}}, \quad (4)$$

где  $I_{c\max}$  - значение максимального выброса интенсивности,  $I_{c\min}$  - значение минимального провала интенсивности на графике зависимости интенсивности выводимого света от координаты X или Z.

На рис. 2. представлена диаграмма распределения интенсивности выводимого излучения в плоскости XZ для расстановки микроструктур, рассчитанных по (1).

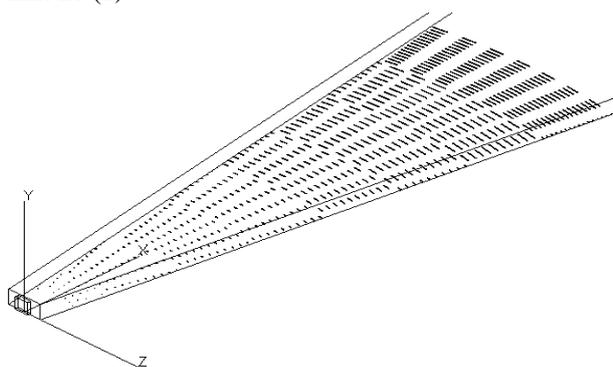


Рис. 2. Расстановка микроструктур для вывода света по формуле (1)

Параметры моделирования:  $h=0,4$  мм,  $L_{\max}=25$  мм, угол сектора в плоскости XZ  $\alpha_{\max}=30^\circ$ , размер светодиода  $0,3 \times 0,3$  мм. Для ускорения моделирования микроструктурами, выводящими свет, заполнена половина волновода, что никак не сказывается на результатах моделирования вывода света в другой половине волновода. Весь волновод был поделен на 14 радиальных областей (секущих колец), коэффициент вывода света  $P=75\%$ . В качестве микроструктур были выбраны микропризмы, сечение которых представляло собой равнобедренный треугольник с углом при вершине  $55^\circ$  и высотой 15 мкм. Расстановка микропризм начинается с расстояния 1 мм от источника. При получении результатов вывода света на рис. 3 была учтена вертикальная симметрия. Моделирование учитывало прохождение 1 500 000 лучей.

Как видно из рис. 3, в начале каждой области вывода света присутствует всплеск интенсивности, который уменьшается к ее концу. Неравномерность вывода излучения составляет в среднем  $\sigma=30\%$ , однако местами достигает 50%. Причина этого – равномерная расстановка микроструктур для вывода света внутри каждой области. Избавиться от этого недостатка можно, отказавшись от равномерной расстановки микроструктур, например, рассчитывая расположение каждой следующей линии микроструктуры с учетом предыдущих по (2).

На рис. 4 приведен пример заполнения того же сектора волновода микроструктурами в виде призм по формуле (2). Параметры расчета те же, что и для рис. 2.

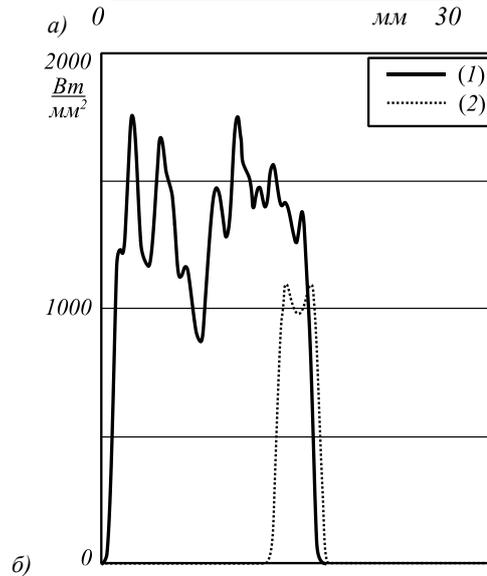
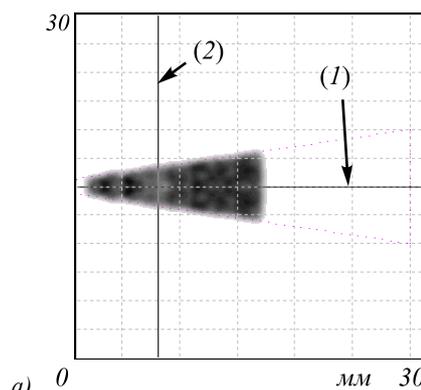


Рис. 3. Результаты вывода света оптической схемой на рис. 2: вывод света в плоскости XZ (а), сечение выводимой интенсивности света вдоль горизонтальных (1) и вертикальных (2) линий, показанных на рис. 3а (б)

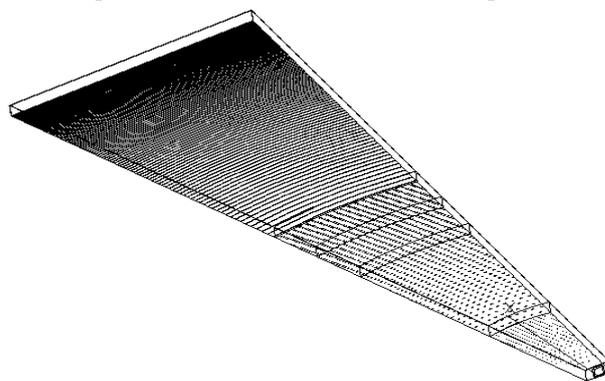


Рис. 4. Расстановка микроструктур для вывода света по формуле (2)

Из рис. 5 видно, что при втором методе (по формуле (2)) расстановки микропризм равномерность выводимого излучения значительно выше и обеспечивается от начала волновода. Максимальная неравномерность выводимого излучения достигает  $\sigma=12\%$ . Основное происхождение неравномерности выводимого излучения на рис. 5 – недостаточное количество лучей, учтенных при трассировке модели. Дальнейшее увеличение количества лучей и числа призм сопряжено с увеличением вычислительной задачи.

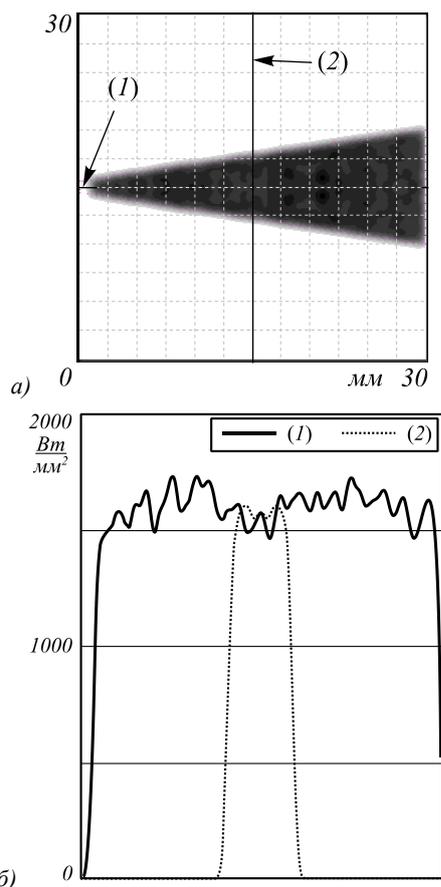


Рис. 5. Диаграмма распределения интенсивности света, выводимого структурой на рис. 4: распределение интенсивности в плоскости XZ (а) и сечения интенсивности вдоль горизонтальной (1) и вертикальной (2) линий на рис. 5а (б)

#### Заключение

Представлены результаты моделирования вывода света двумя методами расстановки микроструктур для вывода света – по формулам (1) и (2). Моделирование показало, что наилучшую равномерность обеспечивает метод (2) непрерывной расстановки микроструктур. В рассмотренном примере достигнута максимальная неравномерность вывода света  $\sigma = 12\%$ . В первом методе неравномерность расстановки микропризм достигла значения  $\sigma = 50\%$ . Для большей равномерности выводимого излучения целесообразно применять наиболее частую расстановку микроструктур наименьшего возможного размера.

#### Благодарности

Работа поддержана российско-американской программой «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF RUX0-014-Sa-06), Российским фондом фундаментальных исследо-

ваний (грант 08-07-9907) и грантом Президента РФ поддержки ведущих научных школ (НШ-3086.2008.9).

#### Литература

1. **Chien, K.-W.** Polarized backlight based on selective total internal reflection at microgrooves / K.-W. Chien, H.-P. D.Shief, H. Cornelissen // *Appl. Opt.*, 2004. - Vol. 43. - P. 4672-4676.
2. Смотреть информацию по продукту по адресу [www.omron.co.jp/ecb/products/bcklight/index.html](http://www.omron.co.jp/ecb/products/bcklight/index.html)
3. Deterministic diffractive diffusers for displays / M. Parikka, T. Kaikuranta, P. Laakkonen, J. Lautanen, J. Tervo, M. Honkanen, M. Kuittinen, J. Turunen // *Appl. Opt.*, 2001. - Vol. 40. - p. 2239-2246.
4. Ultra slim and bendable backlight system with a unified component for liquid crystal display applications / A. Nagasawa, T. Eguchi, Y. Sanai, K. Fujisawa. // *Opt. Review.*, 2008. - Vol. 15. - No. 1. - P. 38-43.
5. **Aoyama, S.** Hybrid normal-reverse prism coupler for light-emitting diode backlight systems / S. Aoyama, A. Funamoto, K. Imanaka // *Appl. Opt.*, 2006. - Vol. 45. - No. 28. - P. 7273-7278.
6. **Hisatake, Y.** Viewing angle controllable LCD using variable optical compensator and variable diffuser / Y. Hisatake, Y. Kawata, A. Murayama // *Digest of technical papers, Society for information display.*, 2005. - Vol. 36. - P. 1218-1221.
7. **Chien, K.-W.** Dual light source for backlight systems for smart viewing adjustable LEDs / K-W. Chien, Y-J. Hsu, H-M. // *Digest of technical papers, Society for information display*, 2006, Vol. 37, P. 1425-1427.
8. Dual-mode switching of a liquid crystal panel for viewing angle control / J-I. Baek, Y-H. Kwon, J.C. Kim, T.H. Yoon // *Appl. Phys. Lett.*, 2007. - Vol. 90. - P. 101104.
9. **Kalantar K.**, Matsumoto S., Onishi T., Takizawa K. SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap, 2000, Vol. 31, p. 1029.
10. **Kalantar K.**, Matsumoto S., Katoh T., Mizuno T. Proc. 10<sup>th</sup> Int. Display Workshops, Fukuoka, 2003, p. 601.
11. **Funamoto A.**, Kawabata Y., Ohira M., Aoyama S. Proc. 11<sup>th</sup> Int. Display Workshops, Niigata, 2004, p. 687.
12. **Funamoto A.**, Yoshida M., Sakurai K., Ohira M. Proc. 12<sup>th</sup> Int. Display Workshops in conjunction with Asia Display 2005, Takamatsu, 2005, p. 1277.
13. **Cornelissen H.**, Huck H., Broer D., Picken S., Bastiaansen C., Maaskant N. SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. 2004, Vol. 35, 1178.
14. **Chang Y.**, Pao Y., Yu C., Yao P. Proc. 13<sup>th</sup> Int. Display Workshops, Otsu, 2006, p. 961.
15. **Fujieda I.**, Takagi Y., Imai K., Inaba Y., Fujii T. Proc. 13<sup>th</sup> Int. Display Workshops, Otsu, 2006, p. 937.
16. **Cirkel P.**, Young N., Slikkerveer P. Proc. 9<sup>th</sup> Int. Display Workshops, Hiroshima, 2002, p. 311.
17. **Hanada T.**, Shiroishi I., Saito N., Yatabe T. Proc. 9<sup>th</sup> Int. Display Workshops, Hiroshima, 2002, p. 401.
18. **Imai, K.** Illumination uniformity of an edge-lit backlight with emission angle control / K. Imai, I. Fujieda // *Opt. Express.*, 2008. - Vol. 16. - No. 16. - P. 11969-11974.

# CALCULATING OF A PERIODIC STRUCTURES FOR THE UNIFORM LIGHT OUTUT FROM A PLANAR WAVEGUIDE

V.V. Kotlyar<sup>1</sup>, A.G. Nalimov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> S.P. Korolyov Samara State Aerospace University, Samara, Russia,

<sup>2</sup> Image processing systems institute of the RAS, Samara, Russia

## Abstract

The method of problem decision of light output from LC display backlight, working with one LED in approximation of thin waveguide is considered. Attention to two methods of calculation, with piecewise continuous density of micro structure arrangement and separate calculated position of each micro structure was paid. Calculation results were modeled by Monte-Karlo method of ray tracing.

**Key words:** waveguide, backlight system, display.

**Citation:** Kotlyar VV, Nalimov AG. Calculating of a periodic structures for the uniform light output from a planar waveguide. Computer Optics 2008; 32(3): 249-52.

**Acknowledgements:** The work was supported by the Russian-American program "Basic Research and Higher Education" (grant CRDF RUX0-014-Sa-06), the Russian Foundation for Basic Research-ments (Grant 08-07-9907) and a grant from the President of the Russian Federation for support of leading scientific schools (NSh- 3086.2008.9).

## References

- [1] Chien K-W, Shief H-PD, Cornelissen H. Polarized backlight based on selective total internal reflection at microgrooves. Appl. Opt. 2004; 43: 4672-4676.
- [2] [www.omron.co.jp/ecb/products/bcklight/index.html](http://www.omron.co.jp/ecb/products/bcklight/index.html)
- [3] Parikka M, Kaikuranta T, Laakkonen P, Lautanen J, Tervo J, Honkanen M, Kuittinen M, Turunen J. Deterministic diffractive diffusers for displays. Appl. Opt. 2001; 40: 2239-2246.
- [4] Nagasawa A, Eguchi T, Sanai Y, Fujisawa K. Ultra slim and bendable backlight system with a unified component for liquid crystal display applications. Opt. Review. 2008; 15(1): 38-43.
- [5] Aoyama S, Funamoto A, Imanaka K. Hybrid normal-reverse prism coupler for light-emitting diode backlight systems. Appl. Opt. 2006; 45(28): 7273-7278.
- [6] Hisatake Y, Kawata Y, Murayama A. Viewing angle controllable LCD using variable optical compensator and variable diffuser. Digest of technical papers, Society for information display 2005; 36: 1218-1221.
- [7] Chien K-W, Hsu Y-J H-M. Dual light source for backlight systems for smart viewing adjustable LEDs. Digest of technical papers, Society for information display 2006; 37: 1425-1427.
- [8] Baek J-I, Kwon Y-H, Kim JC, Yoon TH. Dual-mode switching of a liquid crystal panel for viewing angle control. Appl. Phys. Lett. 2007; 90: 101104.
- [9] Kalantar K, Matsumoto S, Onishi T, Takizawa K. SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap 2000; 31: 1029.
- [10] Kalantar K, Matsumoto S, Katoh T, Mizuno T. Proc. 10th Int. Display Workshops, Fukuoka, 2003, 601 p.
- [11] Funamoto A, Kawabata Y, Ohira M, Aoyama S. Proc. 11th Int. Display Workshops, Niigata, 2004, 687 p.
- [12] Funamoto A, Yoshida M, Sakurai K, Ohira M. Proc. 12th Int. Display Workshops in conjunction with Asia Display 2005, Takamatsu, 2005, 1277 p.
- [13] Cornellsen H, Huck H, Broer D, Picken S, Bastiaansen C, Maaskant N. SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap. 2004; 35: 1178.
- [14] Chang Y, Pao Y, Yu C, Yao P. Proc. 13th Int. Display Workshops, Otsu, 2006, 961 p.
- [15] Fujieda I, Takagi Y, Imai K, Inaba Y, Fujii T. Proc. 13th Int. Display Workshops, Otsu, 2006, 937 p.
- [16] Cirkel P, Young N, Slikkerveer P. Proc. 9th Int. Display Workshops, Hiroshima, 2002, 311 p.
- [17] Hanada T, Shiroishi I, Saito N, Yatabe T. Proc. 9th Int. Display Workshops, Hiroshima, 2002, 401 p.
- [18] Imai K, Fujieda I. Illumination uniformity of an edge-lit backlight with emission angle control. Opt. Express 2008; 16(16): 11969-11974.