

ТОНКИЙ КОЛЛИМАТОР ДЛЯ СВЕТОДИОДОВ

Асланов Э.¹, Досколович Л.Л.^{2,3}

¹Московский центр технологий LG TCM,

²Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет),

³Институт систем обработки изображений РАН

Аннотация

Предложена конструкция коллиматора для светодиодов, обладающего малой толщиной. Коллиматор состоит из рефлектора и преломляющего оптического элемента, работающего по принципу полного внутреннего отражения. Представлен расчёт коллиматора с полной толщиной 5 мм и диаметром 30 мм. Согласно результатам моделирования, для ламбертовского источника с размером $1 \times 1 \text{ мм}^2$ коллиматор обеспечивает формирование пучка с расходимостью по полуспаду интенсивности менее 4 градусов при эффективности 84%. Проведён анализ рабочих характеристик коллиматора в зависимости от размеров источника и от ошибок позиционирования элементов коллиматора.

Ключевые слова: коллиматор, геометрическая оптика, светодиод, трассировка лучей.

Введение

Коллимация излучения светодиода является важной задачей светотехники, возникающей при создании светодиодных устройств прожекторного типа, светосигнальных устройств, светотехнических устройств автомобиля и т.д.

На рис. 1 показан стандартный вид коллиматора, предложенного в патентах компании Philips [1-3]. Все рассматриваемые в данной работе коллиматоры являются телами вращения, соответственно на рисунках приводятся их сечения. Принцип работы коллиматора состоит в следующем. Часть **A** внутренней поверхности полости соответствует гиперboloиду вращения и обеспечивает коллимацию центральных лучей от источника (рис. 1). Лучи, преломлённые на боковой поверхности внутренней полости, испытывают полное внутреннее отражение (ПВО) на наружной параболической поверхности **B**. За счёт использования ПВО эффективность коллиматора (доля излучённого светового потока, выходящая из коллиматора) составляет около 90%. Расходимость выходного пучка варьируется в пределах от 10° до 30° в зависимости от размера светодиода. Здесь и далее под расходимостью пучка понимается полный угол, соответствующий уровню 0,5 спада интенсивности. Толщина коллиматора на рис. 1 составляет не менее 20 мм при диаметре 30 – 40 мм.

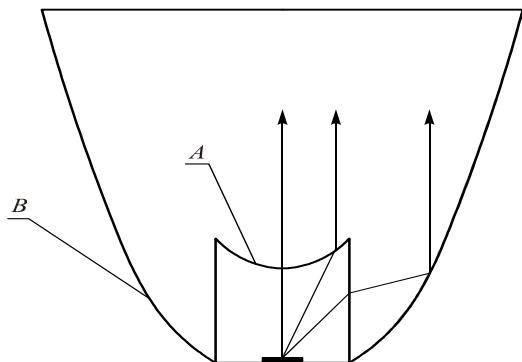


Рис. 1. Оптическая схема коллиматора компании Philips

В работе [4] предложена схема коллиматора с двумя зеркальными поверхностями (рис. 2), позволяющая уменьшить толщину коллиматора до 7 мм.

Принцип работы такого коллиматора сходен с работой оптического концентратора в элементах солнечных батарей. Центральные лучи от источника последовательно отражаются от верхней и нижней зеркальных поверхностей и затем преломляются на передней поверхности (луч **A** на рис. 2). Расчёт поверхности производится с использованием так называемого SMS-метода (simultaneous multiple surface method) [4-6]. Лучи, выходящие из источника под большим углом, испытывают ПВО на передней поверхности (луч **B** на рис. 2). Далее коллимация таких лучей осуществляется, как описано выше. Диаметр коллиматора в [4] составляет около 35 мм. Для светодиода с размером излучающего тела $1,2 \times 1,2 \text{ мм}^2$, излучающего по закону Ламберта, расходимость выходного пучка составляет около 40° [4].

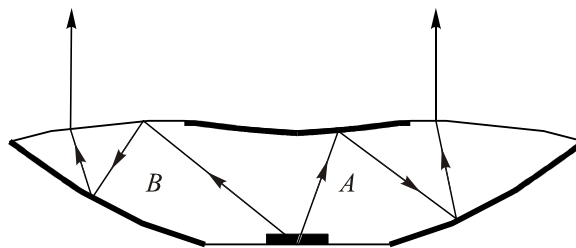


Рис. 2. Оптическая схема коллиматора света с двумя зеркальными поверхностями

В работе [6] предложено ещё одно решение, позволяющее уменьшить габариты оптической системы коллиматора (рис. 3). На центральную часть линзы, которая является гиперboloидом вращения, нанесено зеркальное покрытие (на рис. 3 обозначено утолщённой линией). Нижняя часть линзы представляет собой зеркало френелевского типа и состоит из фрагментов параболоидов вращения (рис. 3). Кроме того, наружная поверхность линзы соответствует массиву микролинз для коллимации выходного пучка. Данная схема позволяет добиться угла

расходимости в $5,2^\circ$, с эффективностью 88% для светодиода с излучающей площадкой диаметром 2 мм. Толщина системы составляет 11 мм при диаметре около 60 мм.

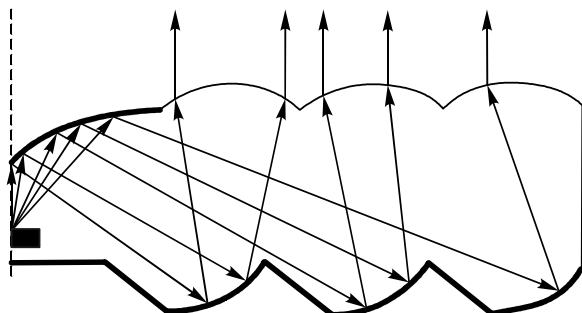


Рис. 3. Оптическая схема коллиматора с массивом микролинз

В настоящей работе предложена новая конструкция коллиматора, обладающего существенно меньшими габаритными размерами. Согласно представленным результатам численного моделирования, предложенный коллиматор обеспечивает формирование пучка с расходимостью менее 4° при эффективности в 83 – 84%.

1. Конструкция коллиматора

Схема предлагаемого коллиматора представлена на рис. 4. В силу симметрии на рис. 4 показана половина сечения коллиматора при $x > 0$. Предполагается, что источник света (светодиод) излучает в направлении, обратном оси Oz (ось указывает на направление на освещаемый объект). Коллиматор состоит из рефлектора и преломляющего оптического элемента (пластины). На внутренней поверхности пластины выполнен рельеф, соответствующий набору призм (рис. 4).

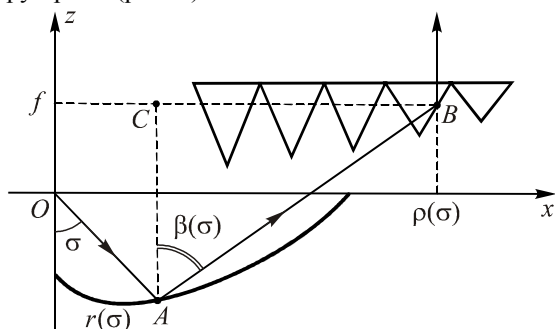


Рис. 4. Оптическая схема предлагаемого коллиматора

Принцип работы коллиматора состоит в следующем. Лучи от источника отражаются от зеркала и затем испытывают ПВО на гранях призм. Ломаная линия OAB на рис. 4 показывает ход одного из лучей. Луч, вышедший из источника под углом σ , отражается от рефлектора в точке A под углом $\beta(\sigma)$ и падает на одну из призм (первая грань призмы перпендикулярна падающему лучу). Далее луч испытывает ПВО в точке B на второй грани призмы и выходит из коллиматора параллельно оптической оси.

Расчёт профиля рефлектора $r(\sigma)$ проведём из условия формирования постоянной освещённости в плоскости пластины $z=f$ (толщиной пластины пренебрегаем). Пусть $\rho(\sigma)$ – радиальная координата точки в плоскости пластины, в которую попадает отражённый от рефлектора луч, вышедший из источника под углом σ (рис. 4). Функцию $\rho(\sigma)$ определим из закона сохранения светового потока, который с учётом радиальной симметрии коллиматора может быть записан в виде:

$$\int_0^\sigma I_0(\alpha) \sin(\alpha) d\alpha = \int_0^{\rho(\sigma)} E(x) x dx. \quad (1)$$

По функции $\rho(\sigma)$ из треугольника ABC на рис. 4 несложно определить функцию $\beta(\sigma)$ в виде:

$$\operatorname{tg}(\beta(\sigma)) = \frac{r(\sigma) \sin(\sigma) + \rho(\sigma)}{f + r(\sigma) \cos(\sigma)}. \quad (2)$$

При известной функции $\beta(\sigma)$ профиль рефлектора определяется из уравнения [7-8]:

$$r(\sigma) = r_0 \cdot \exp\left(\int_0^\sigma \operatorname{tg}\left(\frac{\xi + \beta(\xi)}{2}\right) d\xi\right). \quad (3)$$

Рассмотрим расчёт преломляющих призм, осуществляющих коллимацию лучей. Будем считать, что размер призм достаточно мал, так что угол падения лучей на каждую призму можно считать постоянным. На рис. 5 изображена одна призма и показано ПВО луча $\mathbf{a}_0 = (\sin(\beta), \cos(\beta))$ в точке B . Чтобы луч \mathbf{a}_0 после ПВО на второй грани призмы преобразовался в луч $\mathbf{a}_1 = (0, 1)$, распространяющийся вдоль оптической оси, необходимо, чтобы единичный вектор нормали ко второй грани призмы имел вид:

$$\mathbf{n} = \left(-\sin\left(\frac{\pi - \beta}{2}\right), \cos\left(\frac{\pi - \beta}{2}\right)\right). \quad (4)$$

Условие (4) проверяется прямой подстановкой векторов \mathbf{a}_0, \mathbf{n} в закон отражения в векторной форме [9]:

$$\mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_0 + 2(\mathbf{a}_0, \mathbf{n}) \mathbf{n}. \quad (5)$$

Очевидно, что угол между падающим лучом и нормалью ко второй грани призмы составляет $\gamma = \frac{\pi - \beta}{2}$. Поскольку $\beta \in [0, \pi/2)$, то $\gamma \geq \pi/2$, то есть условие ПВО отражения всегда будет выполняться для материала с показателем преломления $n > \sqrt{2}$. Далее рассмотрим единичный вектор $\mathbf{p} = \left(\cos\left(\frac{\pi - \beta}{2}\right), \sin\left(\frac{\pi - \beta}{2}\right)\right)$. Данный вектор перпендикулярен вектору нормали (4) и направлен

вдоль грани призмы. Легко видеть, что угол, составленный данным вектором (и соответственно гранью призмы) с осью Ox есть $\theta = \frac{\pi - \beta}{2}$. Поскольку первая грань призмы должна быть перпендикулярна лучу, то угол между первой гранью и осью Ox равен β .

Таким образом, углы призмы определены. Отметим, что при $\beta = 60^\circ$ профиль призмы будет равнобедренным треугольником, поскольку $\theta = \beta$.

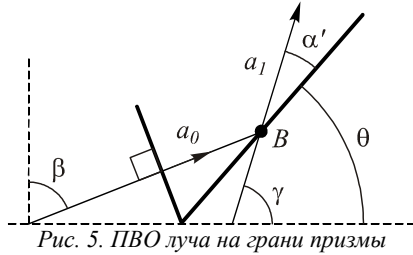


Рис. 5. ПВО луча на грани призмы

При расчёте рефлектора по формулам (1)–(3) внешняя поверхность коллиматора будет иметь постоянную освещённость. Во многих практических задачах требуется лишь коллимация пучка без формирования постоянной освещённости [1-6]. В этом случае достаточно положить $\beta(\sigma) = \beta_0$. При этом рефлектор $r(\sigma)$ соответствует повернутой на угол β_0 параболы:

$$r(\sigma) = r_0 \cos^2\left(\frac{\beta_0}{2}\right) / \cos^2\left(\frac{\sigma - \beta_0}{2}\right). \quad (6)$$

При $\beta = 60^\circ$ и $r(0) = r_0 = 2$ мм получается коллиматор с толщиной около 5 мм и диаметром 30 мм (рис. 6). Отметим, что значение толщины коллиматора приведено с учётом толщины пластины и стенок рефлектора, которые в сумме составляют 3 мм. При $\beta = 60^\circ$ призмы на нижней границе пластины соответствуют равнобедренным треугольникам. Размер сторон призм на рис. 6 составляет 0,5 мм.

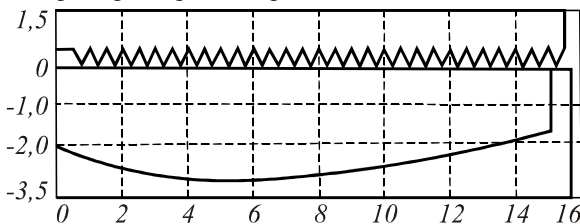


Рис. 6. Профиль рефлектора и пластины с призмами

Отметим, что боковую стенку коллиматора на рис. 6 целесообразно сделать зеркальной. В этом случае отражённый от боковой стенки пучок будет также обрабатываться призмами пластины, как и прямой пучок, отражённый от рефлектора. Отметим также, что поскольку рефлектор на рис. 6 соответствует параболы, повернутой на угол $\beta = 60^\circ$, то центральная часть коллиматора с радиусом $R = r_0 \cdot \operatorname{tg}(\beta_0) = 2\sqrt{3} \approx 3,46$ мм будет неосвещённой. Это позволяет разместить в центральной части коллиматора чип светодиода с радиатором.

2. Результаты численного моделирования

Рабочие характеристики коллиматора на рис. 6 с зеркальной боковой стенкой были исследованы в пакете прикладных программ Zemax [10]. Данная программа предназначена для моделирования работы светотехнических систем с использованием метода трассировки лучей. В качестве источника излучения использовалась площадка размерами 1×1 мм², излучающая по закону Ламберта. Источник располагался на поверхности цилиндра с диаметром 6 мм и высотой 5 мм, который имитировал чип с радиатором. В качестве материалов рефлектора и преломляющей пластины использовались алюминий и полиметилметакрилат (показатель преломления $n = 1,49$), соответственно.

Результаты моделирования распределения интенсивности, формируемого коллиматором, представлены на рис. 7. График на рис. 7 получен в результате трассировки 5000000 лучей. Эффективность коллиматора составила 84% при полном угле расходимости менее 4° . Интересно сравнить полученную расходимость с аналитической оценкой, следующей из теорема Штраубеля (в англоязычной литературе – закон сохранения etendue) [11]:

$$dG = ds_0 d\omega_0 = ds_a d\omega_a, \quad (7)$$

где $d\omega_0$, ds_0 – телесный угол и площадь нормального сечения трубки лучей от источника, а $d\omega_a$, ds_a – телесный угол и площадь нормального сечения для соответствующей трубки лучей на выходной поверхности коллиматора.

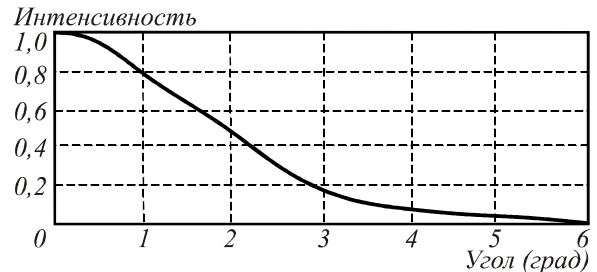


Рис. 7. Зависимость нормированной интенсивности света от угла (Zemax)

Интегрируя (7) по площади и телесному углу, несложно получить следующую оценку:

$$\sin^2(\theta_c / 2) \geq \frac{S_0}{S_a} \sin^2(\theta_0 / 2), \quad (8)$$

где S_0 , S_a – площади источника и выходной поверхности коллиматора. Угол $\theta_0 = \pi/2$ в (7) определяет угол конуса, в пределах которого излучают точки источника. Угол θ_c в (7) представляет угловой размер формируемого коллиматором пучка (максимальный угол конуса лучей на выходной поверхности коллиматора). Согласно (8)

$$\theta_c \geq 2 \arcsin\left(\sqrt{S_0 / S_a}\right) \approx 4,4^\circ.$$

Таким образом, при указанных размерах источника и выходной поверхности коллиматора угловой размер пучка не может быть меньше $4,4^\circ$.

На рис. 8 приведены зависимости эффективности и расходимости коллиматора от параметра r_0 при постоянном диаметре.

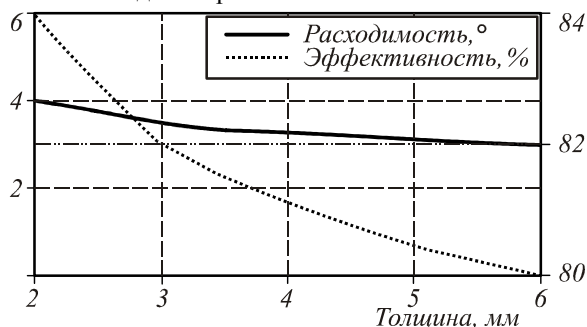


Рис. 8. Зависимость расходимости (левая шкала) и эффективности (правая шкала) коллиматора от параметра r_0

Параметр r_0 определяет толщину коллиматора, которая определяется как сумма параметра r_0 и толщин пластины и стенок рефлектора. Согласно рис. 8 с увеличением толщины (параметра r_0) эффективность коллиматора уменьшается. Это связано с увеличением числа прямых лучей, отражённых от боковой стенки, и увеличением числа лучей, испытывающих два отражения. Расходимость формируемого пучка при этом уменьшается незначительно.

На рис. 9 приведены зависимости эффективности и расходимости от размера источника. Как и следовало ожидать, с увеличением линейного размера источника расходимость возрастает, а эффективность коллиматора уменьшается. Однако даже при размерах источника 2×2 мм² коллиматор формирует пучок с расходимостью менее 7° при эффективности 83%.

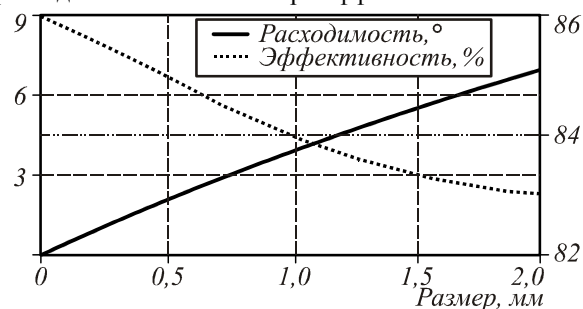


Рис. 9. Зависимость расходимости (левая шкала) и эффективности коллиматора (правая шкала) от размера источника

Был также проведён анализ зависимостей рабочих характеристик коллиматора (эффективности и расходимости) от ошибок позиционирования источника и элементов коллиматора. Оказалось, что поворот всей оптической системы коллиматора относительно источника практически не влияет на рабочие характеристики коллиматора. Так, при углах между нормалью к площадке источника и оптической осью системы $\pm 15^\circ$ расходимость фактически не изменяется, а эффективность падает менее чем на

1% . В то же время расходимость коллиматора оказалась чувствительной к наклону оси симметрии рефлектора. При наклоне оси рефлектора относительно оси коллиматора (оси Oz) на углы $\pm 5^\circ$ эффективность фактически не изменяется, а расходимость увеличивается до 10° .

Смещение центра источника относительно оси симметрии коллиматора приводит к значительным световым потерям и увеличению угла расходимости (рис. 10). Так, при относительном смещении центра источника на 2 мм эффективность падает на 10% , а расходимость возрастает до 7° .

Отметим, что в условиях автоматизированной сборки светодиодных устройств стандартная ошибка позиционирования источника составляет $\sim 0,1$ мм, а ошибки углового позиционирования элементов составляют $\sim 1^\circ$. Таким образом, рис. 8-10 показывают, что предложенная конструкция коллиматора обладает высокой устойчивостью к ошибкам сборки.

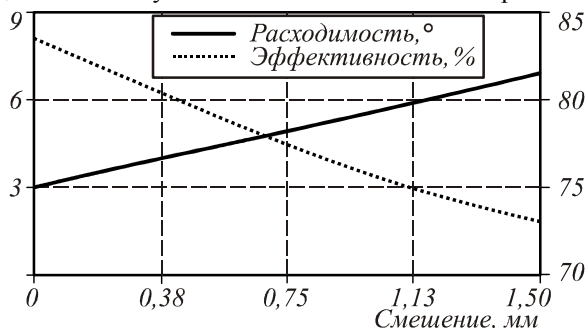


Рис. 10. Зависимость расходимости (левая шкала) и эффективности (правая шкала) от смещения источника

Заключение

Предложенная в работе конструкция коллиматора позволяет при размере источника 1×1 мм² и толщине около 5 мм сформировать пучок с углом расходимости 4° . При использовании алюминиевого покрытия для отражающих элементов коллиматора эффективность коллиматора составляет 84% . Анализ зависимостей рабочих характеристик коллиматора от ошибок позиционирования источника и элементов коллиматора показывает устойчивость предложенной конструкции по отношению к ошибкам сборки.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке государственных контрактов 07.514.11.4060, 07.514.11.4055.

Литература

1. **Marshall**, LED chip package with four LED chips and integrated optics for collimating and mixing the light/ US Patent Application US 2003/0076034 A1.
2. **Marshall**, LED collimation optics with improved performance and reduced size/ US Patent US 6547423 B2.
3. **Rizkin**, Portable luminaire/ US Patent US 7744246 B2.
4. **Munoz, F.** Simultaneous multiple surface design of compact air-gap collimators for light-emitting diodes / F. Munoz, P. Benitez, O. Dross, J. Minano, B. Parkyn // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2004.

5. **Benítez, P.** Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions / P. Benítez, [et al] // *Optical Engineering*. – July 2004. – V. 43, Issue 7. – P. 1489-1502.
6. **Minano, J.** Applications of the SMS method to design of compact optics / J. Minano, P. Benitez, L. Jiayao, J. Infante, J. Chaves, W. Lin // *Proc. of SPIE*. – 2010. – Vol. 7717. – P. 77170I.
7. **Elmer, W.** A Study in Street Lighting Reflector Design/ William B. Elmer // *Applied Optics*. – 1966. – Vol. 5, Issue 2. – P. 343-343.
8. **Досколович, Л.Л.** Расчёт формы поверхности зеркал для формирования изображения в виде линии / Л.Л. Досколович, С.И. Харитонов // *Оптический журнал*. – 2005. – Вып. 72, № 4. – С. 34-37.
9. **Born, M.** Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light (7th ed.) / M. Born, E. Wolf // Cambridge University Press, 1999.
10. Zemax: Software for Optical Design. <http://www.zemax.com>
11. **Welford, W.T.** High collection nonimaging optics / W.T. Welford, R. Winston // Academic Press, 1989.
3. **Rizkin**, Portable luminaire/ US Patent US 7744246 B2
4. **Munoz, F.** Simultaneous multiple surface design of compact air-gap collimators for light-emitting diodes / F. Munoz, P. Benitez, O. Dross, J. Minano, B. Parkyn // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2004.
5. **Benítez, P.** Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions / P. Benítez [et al] // *Optical Engineering*. – July 2004. – V. 43, Issue 7. – P. 1489-1502.
6. **Minano, J.** Applications of the SMS method to design of compact optics / J. Minano, P. Benitez, L. Jiayao, J. Infante, J. Chaves, S.I. Haritonov // *Proc. of SPIE*. – 2010. – Vol. 7717. – P. 77170I.
7. **Elmer, W.** A Study in Street Lighting Reflector Design / William B. Elmer // *Applied Optics*. – 1966. – Vol. 5, Issue 2. – P. 343-343.
8. **Doskolovich, L.L.** Designing a mirror to form a line-shaped directivity diagram / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Haritonov // *Journal of Modern Optics*. – 2005. – Vol. 2. – P. 508-515. – (In Russian).
9. **Born, M.** Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light (7th ed.) / M. Born, E. Wolf // Cambridge University Press, 1999.
10. Zemax: Software for Optical Design. <http://www.zemax.com>
11. **Welford, W.T.** High collection nonimaging optics / W.T. Welford, R. Winston // Academic Press, 1989.

References

1. **Marshall**, LED chip package with four LED chips and integrated optics for collimating and mixing the light/ US Patent Application US 2003/0076034 A1
2. **Marshall**, LED collimation optics with improved performance and reduced size/ US Patent US 6547423 B2

DESIGNING OF SLIM OPTICAL COLLIMATOR

E. Aslanov¹, L.L. Doskolovich^{2,3}

¹LG TCM,

²S.P. Korolyov Samara State Aerospace University,

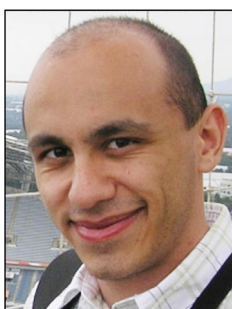
³Image Processing Systems Institute of the RAS

Abstract

The design of a slim LED collimator is proposed. The collimator consists of a reflector and a refractive element which exploits the phenomenon of total internal reflection. The system with the thickness of 5 mm and the diameter of 30 mm was designed. The numerical simulations based on ray-tracing method demonstrate that the collimator provides the beam divergence less than 4° at half maximum of intensity with the efficiency more than 84% for Lambertian light source of 1x1 mm. The collimator performance versus light source size and error of collimator elements positioning is investigated.

Key words: collimator, geometric optic, eikonal function, ray tracing.

Сведения об авторах



Асланов Эмиль, 1986 года рождения. В 2009 году с отличием окончил Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана по специальности «Экологический мониторинг». С 2009 года работает инженером – исследователем в компании LG TCM. Является членом международного научного общества SPIE. Область научных интересов: геометрическая оптика, дифракционная оптика.

E-mail: emil.aslanov@lge.com.

Emil Aslanov (b. 1986) graduated with honors (2009) from Bauman Moscow State Technical University, majoring in Ecological Monitoring. He has been working in LG TCM as an optical R&D engineer since 2009. He is a SPIE member. His current research interests include geometrical optics, mathematical modeling, diffractive optics.



Досколович Леонид Леонидович, 1966 года рождения, в 1989 году с отличием окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне – Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва – СГАУ) по специальности «Прикладная математика». Доктор физико-математических наук (2001 год), профессор, работает ведущим научным сотрудником лаборатории дифракционной оптики Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики СГАУ. Специалист в области дифракционной оптики, лазерных информационных технологий, нанофотоники.

Homepage: <http://www.ipsi.smr.ru/staff/Doskolovich.htm> .

E-mail: leonid@smr.ru .

Leonid Leonidovich Doskolovich (b. 1966) graduated with honours (1989) from the S.P. Korolyov Kuibyshev Aviation Institute (presently, Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov (SSAU)), majoring in Applied Mathematics. He received his Doctor in Physics & Maths (2001) degrees from Samara State Aerospace University. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS, professor at SSAU's Technical Cybernetics sub-department. Current research interests include diffractive optics, laser information technologies, nano-photonics.

Поступила в редакцию 30 декабря 2011 г.