

Построение компактных коллиматоров для мощных светодиодов

В системах управления движением используется видеонаблюдение за объектами, которым зачастую требуется дополнительная подсветка. Экономичные мощные светодиоды хорошо справляются с освещением в широком угле излучения. Для уменьшения угла освещения необходим коллиматор. Расчет коллимирующих линз может быть выполнен, например, в Zemax или Code V. Для расчета сложных коллиматоров, содержащих отражатели, предназначены специальные среды, например LightTools или TracePro. В статье рассмотрены структуры и средства расчета оптимальных коллиматоров, уменьшающих угол излучения на порядок — до 10° , также предлагается ручной вариант расчета.

Характеристики мощных светодиодов

Мощные светодиоды имеют большой угол излучения. Популярные светодиоды компании Cree не являются исключением. Вот, например, характеристики светодиода XR-E2 [5]:

- габариты 3,45×3,45×2,08 мм;
- цвет белый;
- максимальный ток 1 А;
- максимальная мощность 3 Вт;
- максимальный световой поток 283 лм;
- номинальное прямое напряжение 2,9 В белый @ 350 мА;
- максимальное обратное напряжение 5 В;
- угол излучения 110° .

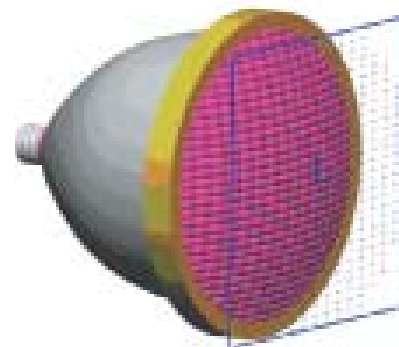
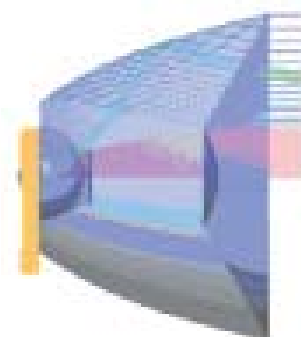


Рис. 2. Геометрия демонстрационных моделей среды проектирования оптических устройств LightTools

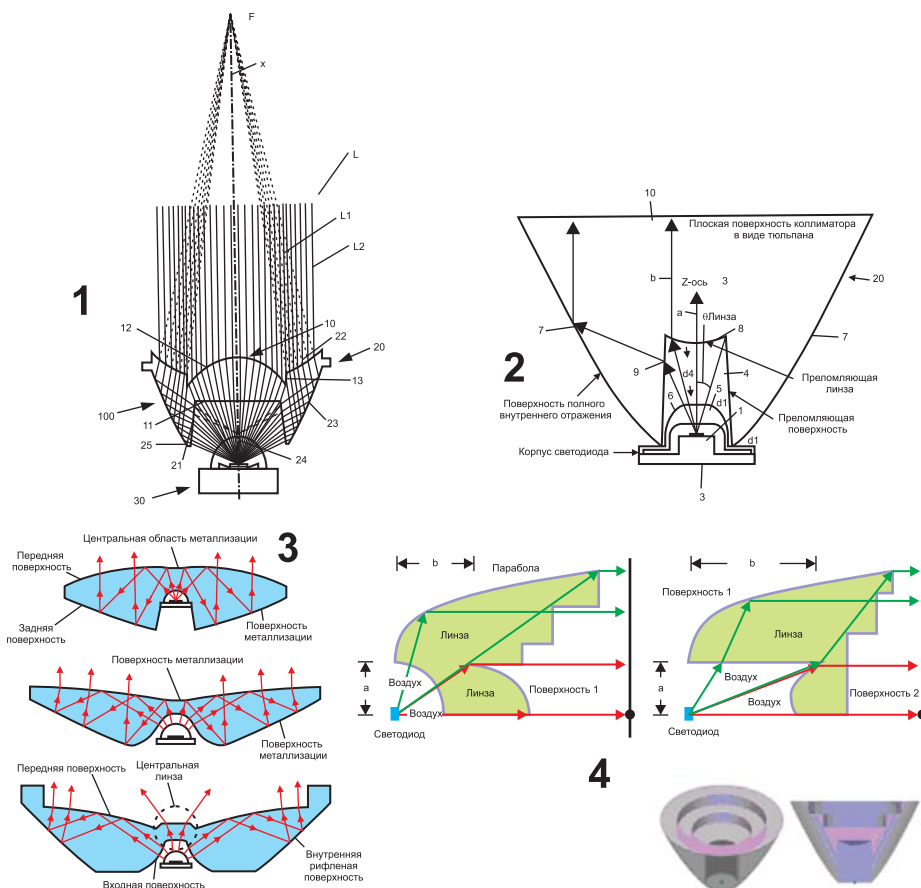


Рис. 1. Примеры структур коллиматоров светодиодов

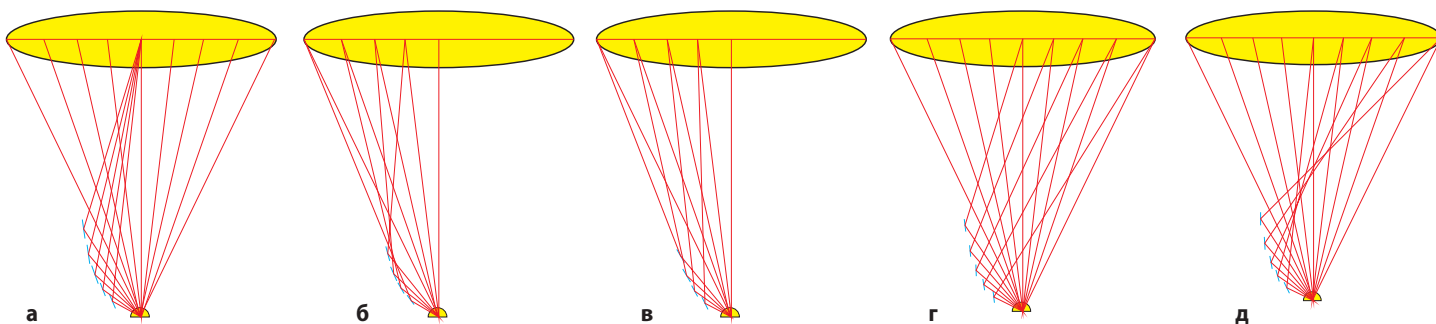


Рис. 3. Варианты распределения лучей в зоне объекта: а) фокусировка в центральной точке; б, г) слабые лучи (см. диаграмму направленности) собираются на периферии зоны объекта, сильные — в центре (для усиления интенсивности центральной зоны); в, д) слабые лучи собираются в центре, а сильные — на периферии (для выравнивания интенсивности засветки)

Коллиматоры

Существует множество вариантов коллиматоров¹, собирающих расходящееся излучение в зоне наблюдения. Среди них можно выделить линзы (преломляющие свет), отражатели и составные коллиматоры, состоящие из линз, преломляющих поверхностей и отражателей (рис. 1, 2).

Требуемое равномерное освещение объекта или другое распределение освещенности достигается применением специальных материалов, рассеивающих поверхностей и корректировкой форм элементов коллиматора и их расположения.

Распределение лучей отражателя

Профиль отражателей вычисляется с учетом угла излучения и диаграммы направленности светодиода, размера объекта и расстояния до него, а также требуемого распределения освещенности объекта.

Некоторые варианты распределения лучей светодиода на поверхности объекта показаны на рис. 3.

Расчет профилей отражателя

Расчет профиля отражателя, фокусирующего лучи точечного источника (рис. 3а), можно выполнить без использования специальных сред для разработки оптических систем.

Расчет выполняется в следующей последовательности;

1. Угловая зона отражаемого излучения и зона освещения делятся на равное количество участков. Чем больше участков, тем точнее расчет.
2. Находится угол отражения первого луча, который должен попасть в заданную точку зоны освещения. Например, угол голубой штриховой линии, лежащей в плоскости, которая отражает обозначенный луч α (рис. 4)
3. На найденной плоскости находится точка падения ближайшего следующего луча. В этой точке находится угол отражения поверхности, которая должна направить луч в следующую точку освещения. И так далее, для всех точек рассматриваемого излучения.

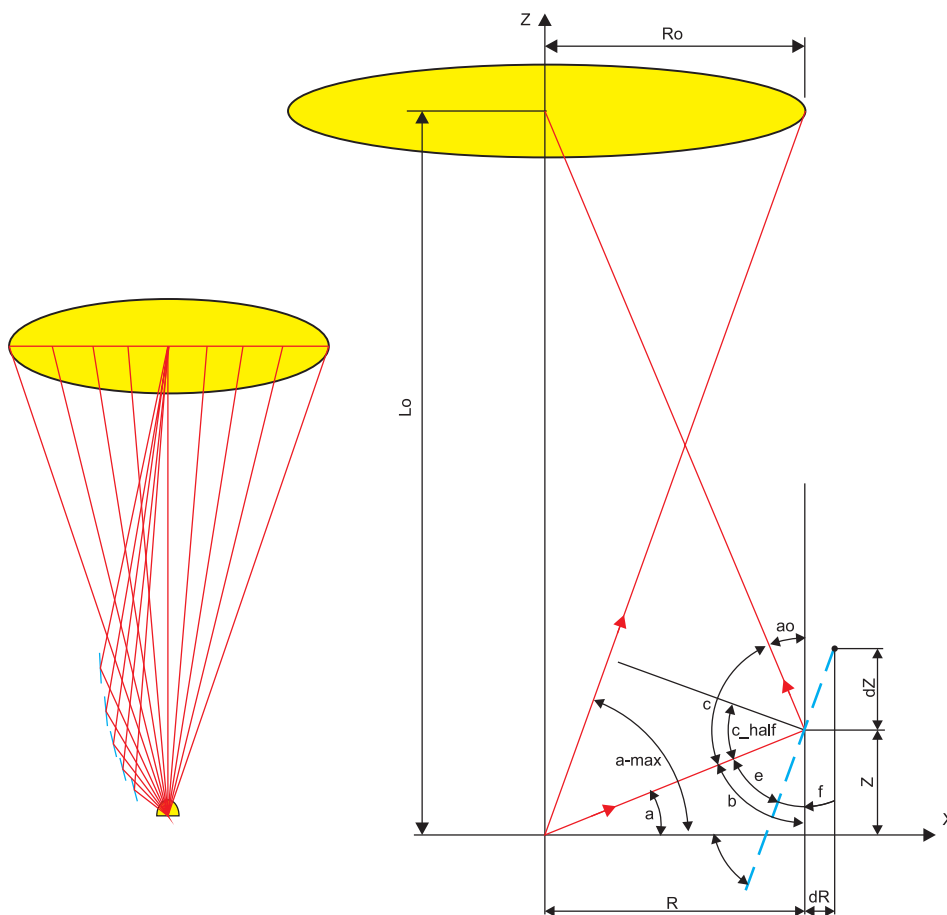


Рис. 4. Распределение прямых и фокусируемых лучей (слева) и диаграмма расчета профиля отражателя точечного источника (справа)

¹ В русскоязычном варианте «Википедии» приведено следующее определение: «Оптический коллиматор — это устройство для получения пучков параллельных световых лучей». В англоязычной версии (<https://en.wikipedia.org/wiki/Collimator>) — «A collimator is a device that narrows a beam of particles or waves». В дословном переводе: «Коллиматор представляет собой устройство, которое сужает пучок частиц или волн». В статье рассматриваются устройства, попадающие под второе определение, а именно — для уменьшения угла излучения.

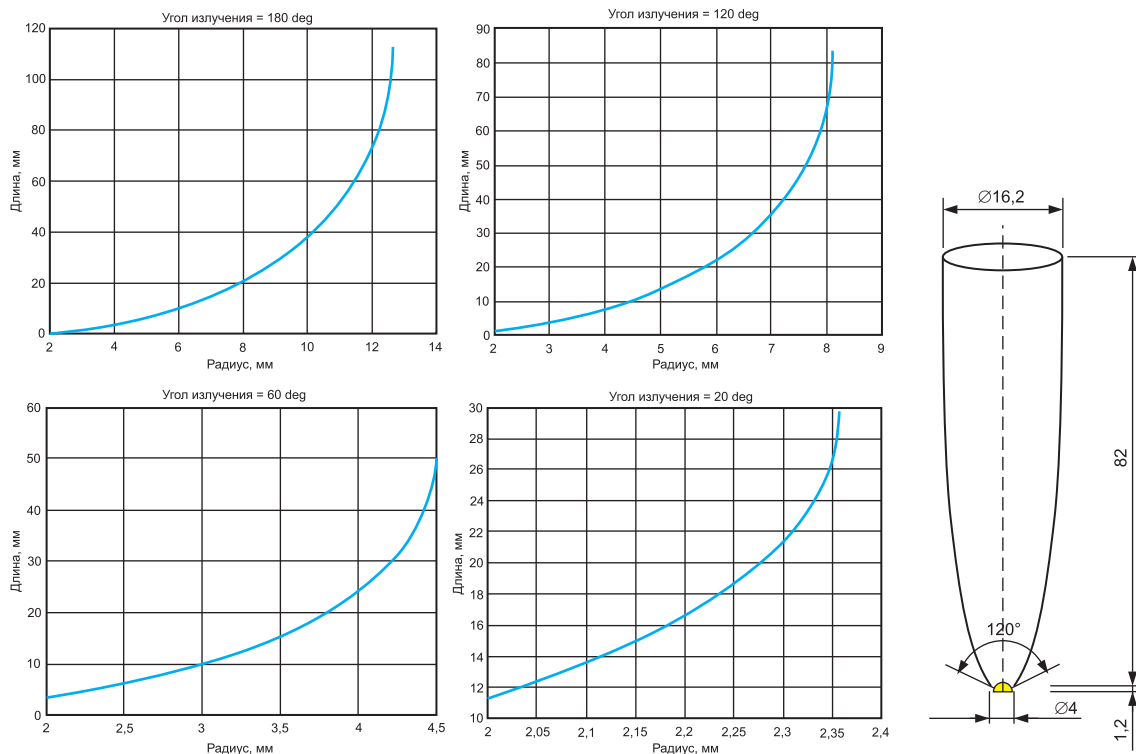


Рис. 5. Профили отражателей излучения точечных источников с углом излучения 180, 120, 60 и 20° для освещения 50-мм объекта, расположенного на расстоянии 300 мм от источника

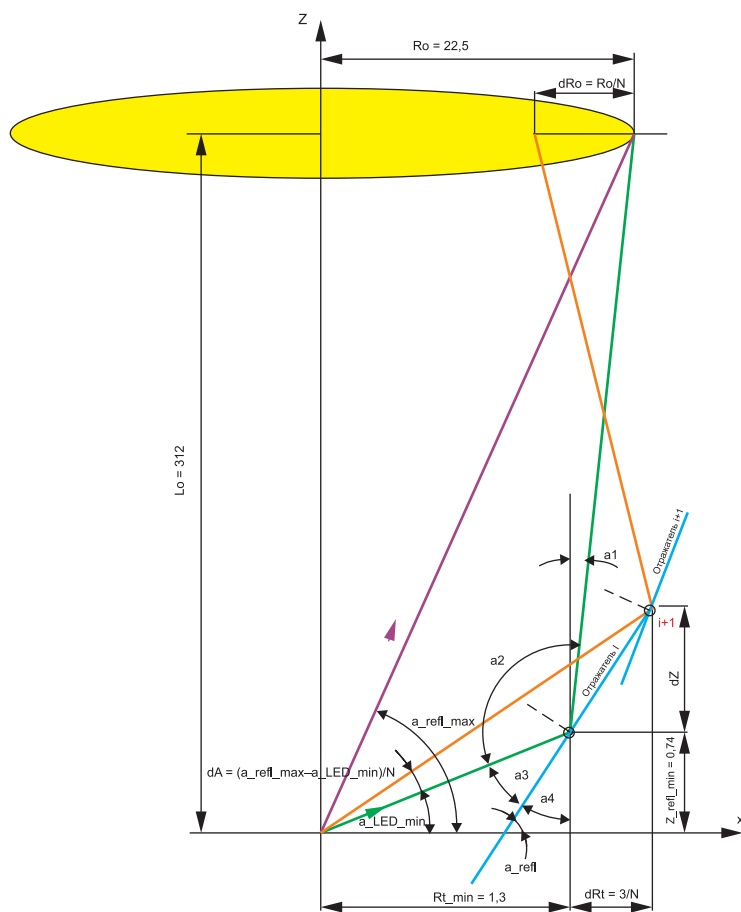


Рис. 6. Диаграмма расчета профиля отражателя лучей точечного источника: «слабые» — периферийные — лучи (диаграммы направленности светодиода) идут к границам объекта, «сильные» — центральные — лучи собираются в центре объекта (рис. 3б)

Совокупность точек отражения и составляет профиль отражателя (рис.5).

Последовательность расчета отражателей можно использовать для сведения лучей в одной точке (вариант а, рис. 3), для равномерного распределения лучей от центра к периферии зоны освещения (варианты в, д, рис. 3) от периферии к центру (варианты б, г, рис. 3) или для распределения лучей по другому закону.

Диаграмма расчета профиля отражателя (рис. 3б) показана на рис. 6.

Сравнительные профили отражателей вариантов А, Б, В, Г, Д (рис. 3) показаны на рис. 7. Максимальный диаметр отражателей ограничен 6 мм.

Сравнение профилей (рис. 7) и распределения лучей (рис. 3) показывает, что длина коллиматоров и диапазон собираемых лучей максимальны для вариантов Г и Д. Коллиматор Г обеспечивает лучшую равномерность освещения объекта, чем коллиматор Д. Коллиматор Б имеет наибольшую зону для размещения линзы, которая соберет лучи не коснувшиеся отражателя. Угол расхождения прямых лучей, прошедших внутри отражателя Б, составляет 60° (как (90°-60°)×2).

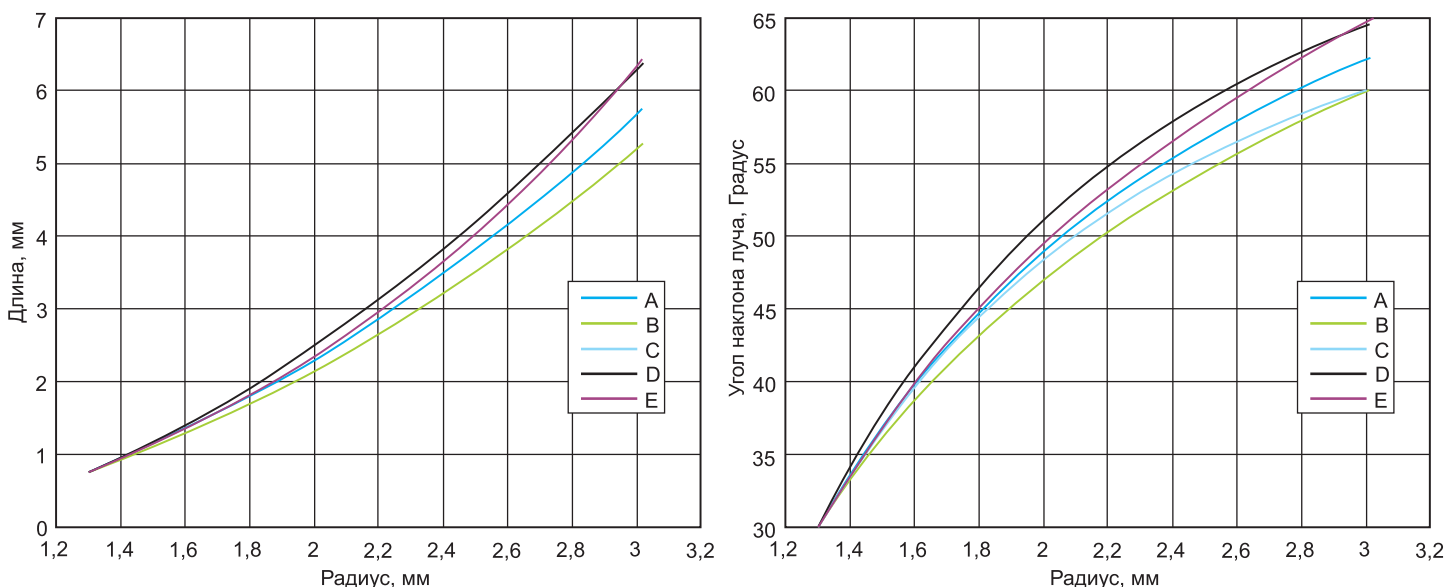


Рис. 7. Профили 6-мм отражателей (слева) и углы отражаемых лучей (справа). Здесь углы рассчитаны относительно плоскости источника. Так, углу 30° соответствует угол излучения $120^\circ = 2 \times (90^\circ - 30^\circ)$. Соответственно, минимальный угол прямых лучей (не касающихся отражателя) равен 50°, как $2 \times (90^\circ - 65^\circ)$

Составной компактный коллиматор

Составной коллиматор включает отражатель ограниченного размера

и линзу, которая фокусирует лучи, не собранные отражателем. Пакеты программ LightTools или TracePro используются для расчета коллима-

торов с отражателями и линзами. Расчет линзы может быть выполнен отдельно, например в среде Zemax или Code V.

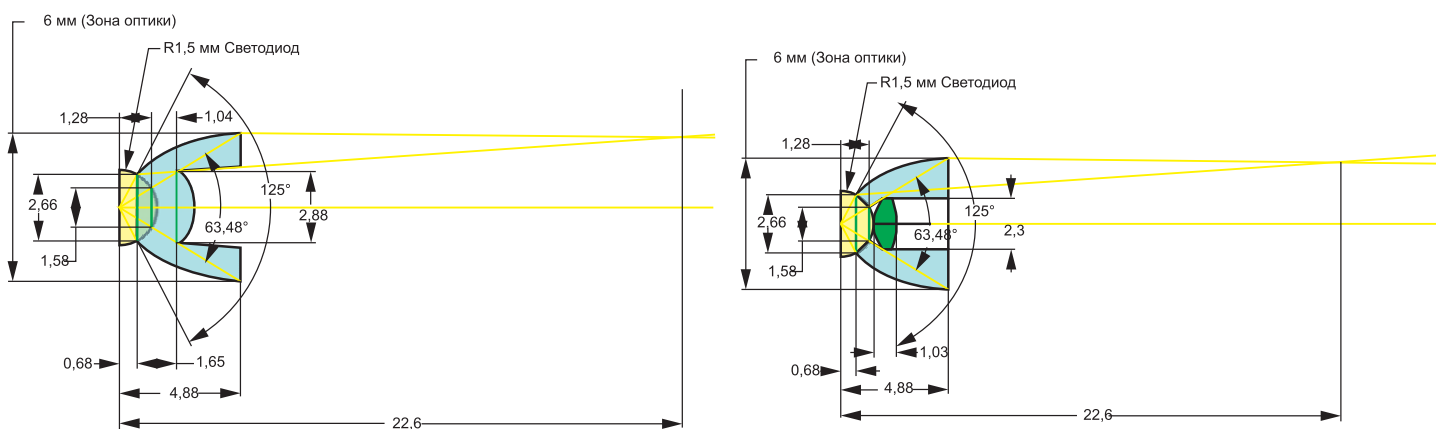


Рис. 8. Структуры компактного коллиматора из органического стекла ПММА (слева) и коллиматора со вставной линзой из стекла BK7 (справа) для освещения 50-мм объектов с расстояния 300 мм. Расчет отражающей поверхности выполнен в среде MATLAB, для расчета линзы использовалась среда Zemax

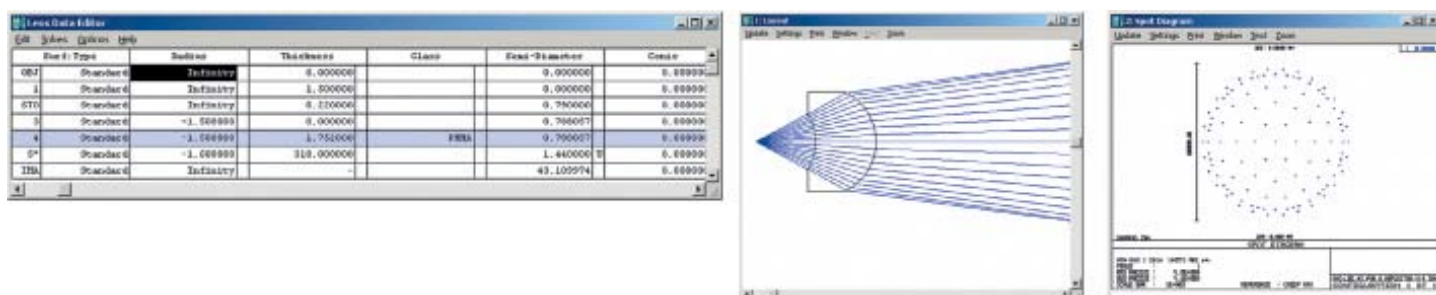


Рис. 9. Результаты расчета линзы коллиматора рис. 8 в Zemax

Построение отражателя в LightTools

Пакет программ LightTools позволяет выполнить расчет коллиматоров и оптимизировать их параметры в автоматическом режиме.

Результаты расчета в среде LightTools профиля оптимального отражателя без ограничения его размеров для освещения 50-мм объекта, удаленного от светодиода XP-E2 на 300 мм, показаны на рис. 10. Профиль отражателя описан кривой Безье [6]. Модель светодиода XP-E2 взята из библиотеки LightTools. Оптимальные выходной диаметр и длина модели коллиматора составили 12,9 и 18,9 мм соответственно.

Ограничение диаметра отражателя 6,2 мм привело к снижению его эффективности с 17,5% до 5,6% (рис. 11). Это связано в основном с тем, что с уменьшением площади отражения возросло количество прямых лучей светодиода, не попадающих в зону объекта.

Уточненная модель светодиода отличается от точечного источника тем, что излучение формируется множеством точечных источников, распределенных по всей поверхности диода, например в зоне 1×1 мм для XP-E2. Углы излучения и диаграммы распределения силы света всех источников равны.

Профиль отражателя излучения распределенного источника (рис. 12) отличается от профиля отражателя для сосредоточенного источника (рис. 11), однако их эффективность (~5,6%) совпадает.

Сравнение профилей отражателей, рассчитанных в MATLAB и LightTools

Профили отражателей, показанные на рис. 13, рассчитаны в MATLAB (профили: А, Б, В, Г, Д) и LightTools (профили: LT point, LT dist, LT unlim). В MATLAB выполнен ручной расчет для точечных источников. В LightTools оптимизация профилей выполнена в автоматическом режиме для точечного и распределенного источников с ограничением (6,2 мм) и без ограничения диаметра отражателя для равномерного освещения 50-мм объекта, удаленного от источника на 310 мм.

Алгоритмы оптимизации параметров в LightTools скрыты от пользователя. Для понимания алгоритма оптимизации LightTools, который использовался при расчете профиля LT dist (рис. 13), по-

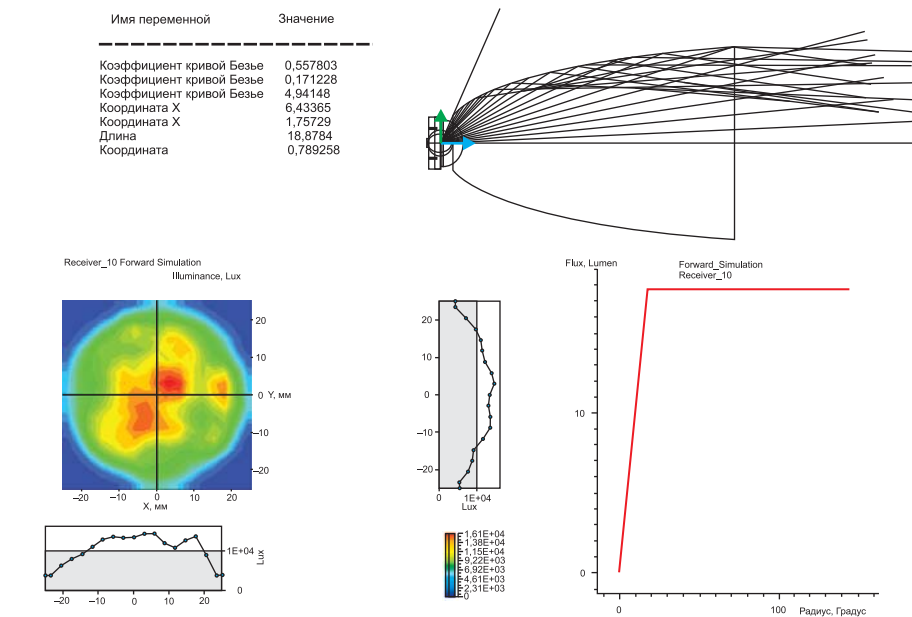


Рис. 10. Размеры и эффективность отражателя Ø12,9×18,9 мм. Эффективность 17,5% определяется отношением количества лучей, достигших объекта, к количеству лучей, испускаемых источником

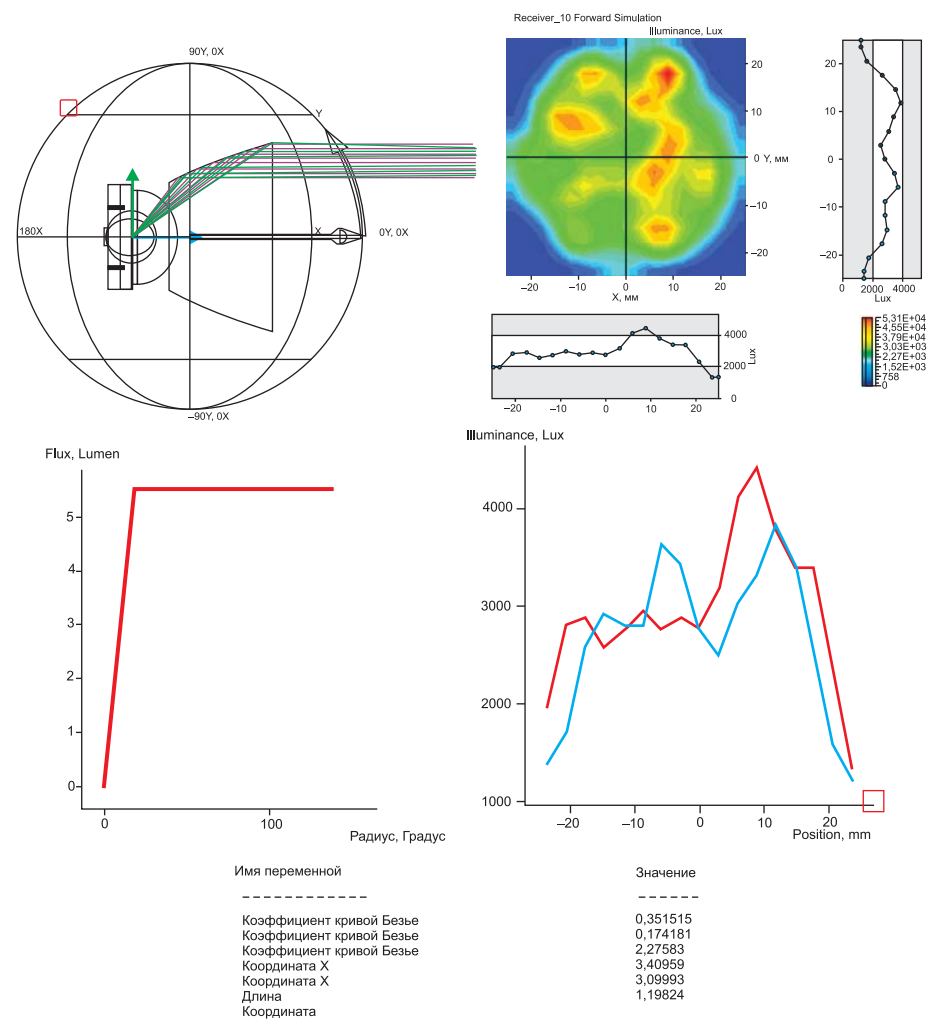


Рис. 11. Характеристики освещенности и параметры оптимального отражателя, собирающего лучи светодиода XP-E2 в диапазоне 69–103°. Максимальный диаметр отражателя ограничен 6,2 мм. Эффективность коллиматора ~5,6%

Имя переменной	Значение
Координата	1,0208
Длина	3,2213
Коэффициент кривой Безье	0,43229
Коэффициент кривой Безье	0,3006
Коэффициент кривой Безье	2,3413
Координата X	3,061
Координата X	1,75

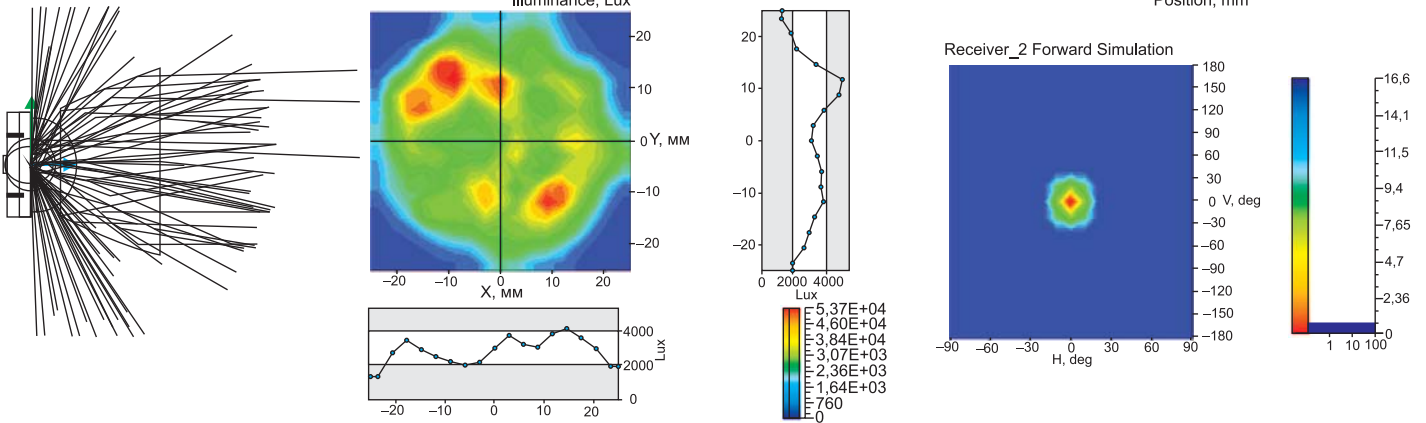
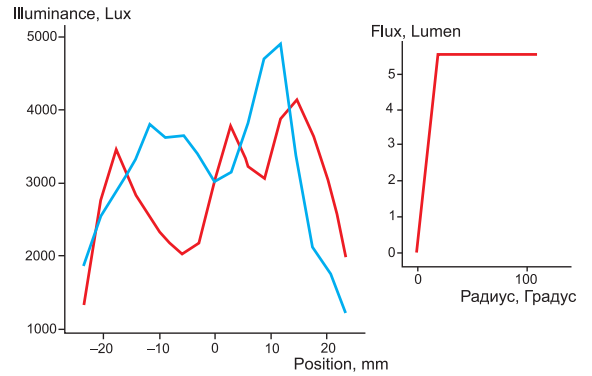
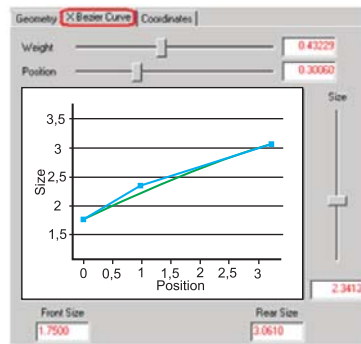


Рис. 12. Оптимальные параметры LightTools отражателя излучения распределенного источника XP-E2. Максимальный диаметр отражателя ограничен 6,2 мм. Эффективность коллиматора ~5,6%

строено распределение лучей в MATLAB (рис. 14).

Распределение лучей (рис. 14) показывает, что оптимизация LightTools нашла профиль отражателя для центрального точечного источника с освещением 1/3 зоны объекта и использовала этот про-

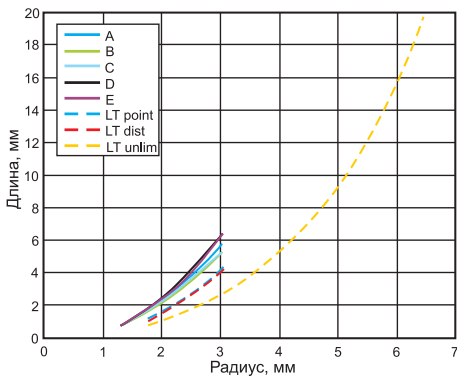


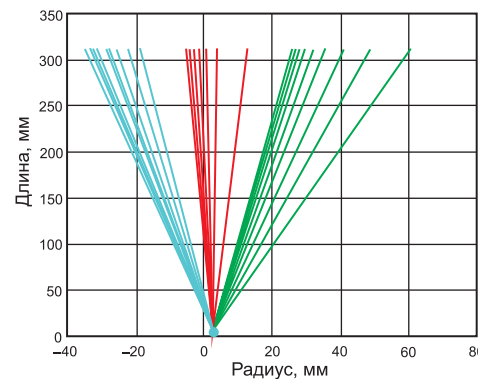
Рис. 13. Профили отражателей: А, Б, В, Г, Д — ограниченного диаметра (6 мм), рассчитаны в MATLAB для точечного источника; LT point — ограниченного диаметра (6,2 мм), рассчитан в LightTools для точечного источника; LT dist — ограниченного диаметра (6,2 мм), рассчитан в LightTools для распределенного источника; LT unlim — свободного размера, рассчитан в LightTools для точечного источника

филь для освещения всей зоны объекта источниками излучения, распределенными на площади светодиода 1×1 мм.

Ручной расчет коллиматора

Для выполнения ручных расчетов отражателя распределенного источника необходимо:

1. Найти координаты точки отражателя, ближайшей к источнику.



2. Рассчитать профиль отражателя (см. алгоритм раздела «Расчет профилей отражателя» (рис. 4) для уменьшенной зоны объекта, например 1/3.

Через начальную точку отражателя, ближайшую к источнику, должны проходить лучи, испускаемые всеми точками плоскости светодиода. Прямые лучи, проходящие через начальную точку, должны освещать зону, соразмерную

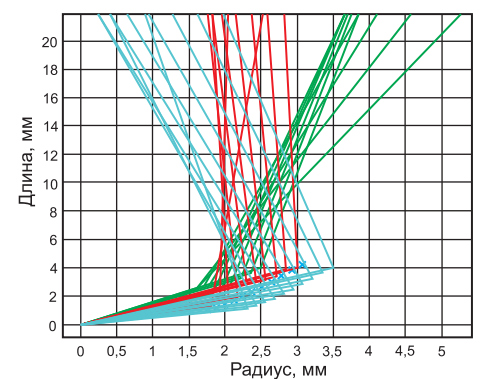


Рис. 14. Ход лучей распределенного источника, отражаемых в зону 50 мм с расстояния 310 мм: общая диаграмма (слева); увеличенный фрагмент (справа). Рассматривается излучение от краев (голубые и зеленые линии) и центра (красные линии) распределенного источника. Разделение краевых и центрального пучков 1×1-мм источника достигается смещениями отражателя на ±0,5 мм

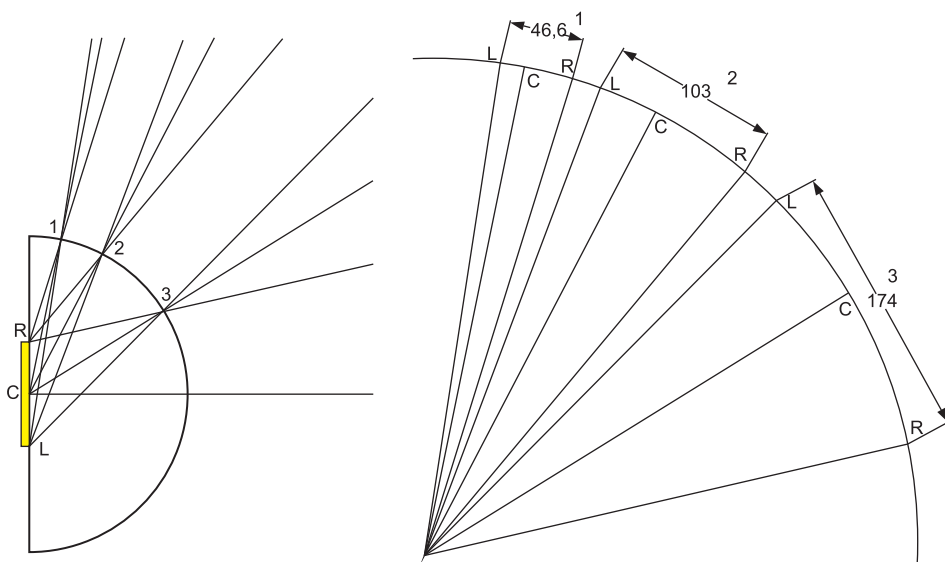


Рис. 15. Построение лучей для поиска начальной точки отражателя. Зоны располагаются на окружности радиусом 310 мм (правый рисунок), равном расстоянию до объекта. На левом рисунке показано увеличенное изображение с поверхностью светодиода радиусом 1,5 мм

с объектом, находящимся на требуемом расстоянии от источника.

Положению начальной точки отражателя соответствует точка 1 на поверхности светодиода радиусом 1,5 мм (рис. 15), через которую проходят крайние (L и R) и центральный (C)

лучи распределенного излучателя в зону ~50 мм, отстоящую от источника на 310 мм.

Угол излучения рассчитанного коллиматора с отражателем можно уменьшить, включив в структуру коллиматора линзу, как показано на рис. 8. ●

Литература

1. Collimation lens system for LED. Патент US 7580192 B1.
2. LED collimation optics with improved performance and reduced size www.google.com/patents/US6547423
3. RXILED collimator needs no metalization www.laserfocusworld.com/articles/2012/01/rxi-led-collimator-needs-no-metalization.html
4. LED OPTICS: Efficient LED collimators have simple design <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue-06/world-news/efficient-led-collimators-have-simple-design.html>
5. Delivering high performance and lower system cost to XLamp XP LED designs www.cree.com/LED-Components-and-Modules/Products/XLamp/Discrete-Directional/XLamp-XPE2
6. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D0%B7%D1%8C%D0%B5_%D0%9F%D1%8C%D0%B5%D1%80
7. Dr. Bob Davidov. Построение идеальной оптики в Zemax. http://portalnp.ru/wp-content/uploads/2016/07/4.7_Paraxial_Optics_Design_in_Zemax_1a.pdf
8. Dr. Bob Davidov. Компьютерные технологии управления в технических системах. <http://portalnp.ru/author/bobdavidov>