

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СО СВЕТОДИОДАМИ

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 681.3, 621.372.542
ББК 22.343
P248



**Инновационная образовательная программа
"Развитие центра компетенции и подготовка
специалистов мирового уровня в области
аэрокосмических и геоинформационных технологий"**

Авторы: *В.В. Котляр, С.Н. Хонина,
Д.В. Нестеренко, А.Г. Налимов*

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. В.В. Ивахник,
д-р техн. наук, проф. И.П. Завершинский

P248 **Расчет оптических систем со светодиодами:** учеб. пособие/
В.В. Котляр [и др.]. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та,
2007. – 80 с.: ил.

ISBN _____

В пособии представлено краткое описание программного обеспечения для моделирования оптических систем. Рассмотрено моделирование ряда оптических систем ввода светодиодного излучения для использования в качестве подсветки в жидкокристаллических дисплеях. Учебное пособие предназначено для студентов специальности 010501 «Прикладная математика и информатика», направления 010500 «Прикладные математика и информатика», направления 010600 «Прикладные математика и физика», дисциплины: «Синтез элементов оптических систем», «Математическое моделирование».

УДК 681.3, 621.372.542
ББК 22.343

ISBN _____

© Котляр В.В., Хонина С.Н.,
Нестеренко Д.В., Налимов А.Г., 2007
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ БАЗА	7
2. ОПИСАНИЕ TRACERPRO	10
3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ АНАЛИЗА	40
4. РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	43
4.1. Неколлимированный ввод излучения от светодиода в волновод.....	43
4.2. Расчет коллимирующей структуры светодиода для устройства задней подсветки	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	75
СПИСОК СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ	76
СПИСОК КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ	77
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	78

ВВЕДЕНИЕ

Растущие требования, предъявляемые к эргономичности современной техники, заставляют производителей искать новые решения при проектировании жидкокристаллических (LCD) мониторов, приборных панелей автомобилей и других аналогичных устройств. Чтобы добиться наиболее равномерного и комфортного освещения экрана монитора или приборной панели, создаются сложные системы подсветки, в производстве которых используются светопроводящие элементы со сложными оптическими свойствами.

Система подсветки жидкокристаллического дисплея – это оптическая система формирования излучения, характеристики которой влияют на эффективность подсветки. Принцип работы систем подсветки жидкокристаллических мониторов и аналогичных устройств заключается в передаче светового излучения от источников света через светопроводящие элементы на экран дисплея или приборной панели.

Традиционная система подсветки обычно содержит светодиод или лампу дневного света, волноводную пластину (ВП), отражатель для ВП, два призматических листа, два диффузионных листа и т.п. [1, 2]. В торцевой системе подсветки свет от источника вводится в ВП через один из торцов. Распространение света внутри ВП основывается на принципе полного внутреннего отражения. Далее лучи рассеиваются матрицей оптических неоднородностей, находящихся на поверхности ВП. Рассеянный с поверхности ВП свет рассредотачивается диффузионным листом. Два призматических листа с пилообразным сечением расположены перпендикулярно друг другу на диффузионном листе для концентрирования света в конусе обзора наблюдателя, обычно перпендикулярном поверхности системы подсветки, как показано на рис. 1.

Для создания необходимого уровня и распределения выходного светового излучения светопроводящим элементам придаются специальные свойства поверхностного и объемного рассеивания. Свет, распространяющийся в светопроводящих элементах, рассеивается на поверхностях или в объеме этого элемента, покидает его и создает требуемое распределение интенсивности и угловое распределение. Свойства поверхностного рассеивания обеспечиваются посредством создания на поверхности светопроводящего элемента спе-

циальной микроструктуры в виде рассеивающих микроэлементов заданной формы, размера, ориентации и распределения.

Для управления направлением распространяющихся лучей в торцевой подсветке с лампой дневного света в качестве источника света была разработана матрица линейных сужающихся призматических элементов на задней поверхности ВП [3]. Однако, если поперечное угловое распределение света узкое вдали от источника света, вблизи источника угловое распределение широко.

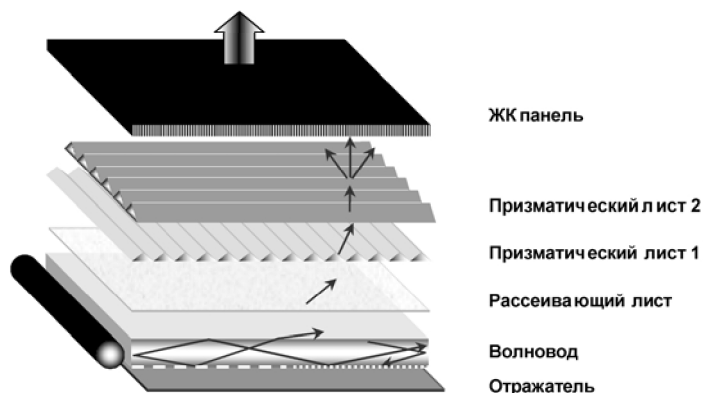


Рис. 1. Оптическая схема традиционной системы подсветки

Использование коллиматоров в структурах подсветки на базе светодиодов позволяет убрать один призматический лист, оптимизировать форму углового распределения выходного излучения, увеличить выходную энергию и однородность интенсивности по поверхности подсветки.

Основные требования к дизайну системы подсветки включают: максимизация энергетической эффективности, уменьшение размеров для портативных дисплеев. Чтобы уменьшить стоимость производства, а также сделать дизайн модуля подсветки тоньше путем исключения призматического листа, повысить яркость и энергетическую эффективность, устранить темные зоны между светодиодами, необходима разработка оптических структур ввода излучения светодиодов, выполняющая функции распределения и коллимации света.

Проектирование и производство современных оптических систем (таких как осветительные системы жидкокристаллических дисплеев или панелей приборов) требует моделирования сложных физических явлений. Модели распространения света в светорассеивающих элементах являются частью систем оптического моделирования. Такие системы обеспечивают сквозное моделирование, то есть распространение света от источников до приемников излучения. Именно поэтому модели распространения света в светорассеивающих элементах должны быть физически аккуратными и эффективными.

По функциональности оптические программы можно разделить на несколько групп:

- инструменты для проектирования и расчета детерминированных оптических систем (Straight ray analysis – анализ методом прямых лучей). К ним относятся объективы фотоаппаратов, телескопы, бинокли и т.д. Здесь может быть предсказана траектория каждого светового луча. Одновременно осуществляется управление любым световым лучом;
- программы для расчета оптических систем, где предсказать ход луча невозможно. В английской терминологии этот процесс называется Nonsequential ray tracing – непоследовательная трассировка лучей;
- программы для проектирования светотехники, понимаемой как недетерминированная оптическая система (светильники, автомобильные фары и фонари);
- средства для обработки результатов оптических измерений, подготовки математических моделей источников света.

Моделирование оптических систем со светодиодами требует непоследовательной трассировки лучей. Далее будет рассмотрена программа TracePro – разработка фирмы Lambda Research Corporation, (<http://www.lambdare.com>).

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ БАЗА

TracePro – универсальная программа, способная моделировать крайне широкий круг явлений и объектов. Ограничимся изложением того материала, который позволит осознанно ставить и решать проблемы моделирования оптических светодиодных систем. Мы полностью исключим задачи волновой оптики, исследующей явления интерференции, дифракции, поляризации, других видов зависимости оптических параметров от длины волны, из рассмотрения, ограничившись перечислением соответствующих функций программы.

Изложим базовые понятия светотехники, необходимые для оценки функциональности программы. Конкретные факты, связанные с работой процедур, будут сопровождать описание элементов интерфейса.

Сила света в заданном направлении – это световой поток от источника, заключенный в малом телесном угле. Единица измерения – кандела (кд или cd). Также для измерения силы света используется свеча – 1 свеча = 1,0005 кд.

Световой поток – это энергия, излучаемая источником в видимом диапазоне длин волн. Единица измерения светового потока – люмен (лм или lm). Это поток, который излучается источником с силой света 1 кд в телесном угле 1 стерадиан (далее – ср). Световой поток – основная характеристика источника света.

Освещенность – отношение суммарного потока, упавшего на некоторую поверхность, к площади этой поверхности. Единица измерения освещенности – люкс (лк или lux). Это освещенность такой поверхности, на каждый квадратный метр которой равномерно падает поток в 1 лм.

Яркость – это отношение силы света элемента поверхности в заданном направлении к площади его проекции на плоскость, перпендикулярную этому направлению. Единица измерения яркости – кд/м². Это яркость поверхности, которая в перпендикулярном направлении излучает силу света 1 кд с 1 м². Также для измерения яркости используется нит – 1 нит = 1,0005 кд/м².

Светимость – это отношение потока источника к площади источника. Единица измерения – лм/м². Это светимость такой поверхности, которая излучает с 1 м² световой поток равный 1 лм.

Иногда для описания оптических процессов используются энергетические величины. Перечислим некоторые из них.

Поток излучения – величина энергии, переносимой полем в единицу времени через заданную площадку. Единица измерения – Вт.

Поверхностная плотность потока энергии (энергетическая освещенность при освещении поверхности потоком) – величина потока, приходящегося на единицу площади. Единица измерения – Вт/м².

Энергетическая яркость – величина потока, излучаемого единицей площади в единицу телесного угла. Единица измерения энергетической яркости – Вт/(ср·м²).

Плоский ламбертовский излучатель – источник, диаграмма распределения силы света которого имеет вид окружности (рис. 2). Этот тип излучения, как правило, используется для моделирования излучения светодиодов, плоских излучателей и т. д.

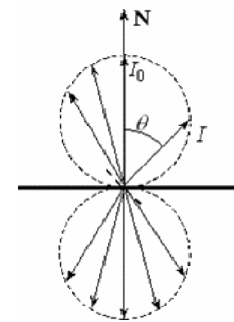


Рис. 2. Плоский ламбертовский излучатель

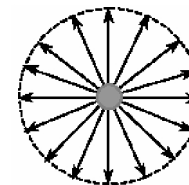


Рис. 3. Сферический ламбертовский излучатель

Сферический ламбертовский излучатель – источник, распределение силы света которого одинаково во всех направлениях (рис. 3). Этот тип излучения, как правило, используется для моделирования излучения, порождаемого нитью накаливания, поверхностью люминесцентной лампы и т.д.

Угол падения – это угол между лучом, падающим на преломляющую или отражающую поверхность, и нормалью к поверхности в точке падения.

Угол преломления – это угол между преломленным лучом и нормалью к поверхности в точке преломления.

Угол отражения – это угол между отраженным лучом и нормалью к поверхности в точке отражения.

Закон преломления – падающий луч, преломленный луч и нормаль к поверхности лежат в одной плоскости; произведение показателя преломления на синус угла между лучом и нормалью сохраняет свое значение при переходе в следующую среду.

Полное внутреннее отражение (ПВО) – при переходе луча из одной прозрачной среды в другую часть энергии пропускается, а другая – отражается; если свет переходит из оптически более плотной среды в менее плотную, и если синус угла падения больше или равен отношению коэффициента преломления среды, в которую луч попадает, к коэффициенту преломления среды, из которой он идет, то весь световой поток отражается.

Оптическая длина луча – произведение показателя преломления на геометрическую длину пути.

Световой поток, падающий на тело, можно разделить на три составные части: отраженный, поглощенный и прошедший.

Коэффициент отражения – отношение отраженного светового потока к падающему.

Коэффициент поглощения – отношение поглощенного светового потока к падающему.

Коэффициент пропускания – отношение прошедшего светового потока к падающему.

Равномерность распределения интенсивности U рассчитывается на основе следующего соотношения:

$$U = 1 - \frac{\sum_N |I_j - \bar{I}|}{N\bar{I}}, \text{ где } \bar{I} = \frac{1}{N} \sum_N I_j, \quad j = 1, \dots, N,$$

I_j – интенсивность света в точке j ; j – совокупность точек измерения; N – число точек измерения; \bar{I} – среднее значение интенсивности.

2. ОПИСАНИЕ TRACEPRO

TracePro имеет Windows-интерфейс. В пакете предусмотрены System Tree (Дерево проекта), падающее меню, Toolbars (Панели инструментов). Большинству объектов поставлены в соответствие контекстные меню, вызываемые щелчком правой кнопки мыши при нахождении над объектом или после его активизации.

Дерево проекта TracePro функционально схоже с проводником Windows (рис. 4). Дерево содержит объекты, присутствующие в модели, образуя иерархическую структуру. Уровней всего два: первый – объекты, содержащие поверхности, второй – поверхности. В нижней части ветви, соответствующей объекту или поверхности, показаны назначенные им свойства.

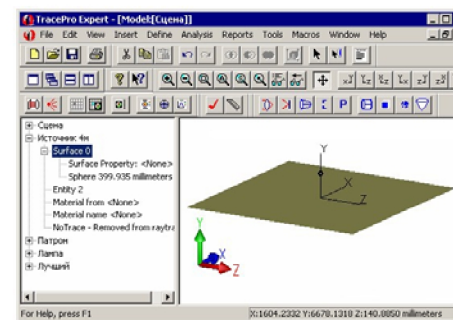


Рис. 4. Дерево проекта TracePro

Панели инструментов TracePro содержат ограниченное подмножество команд. Их содержание не может настраиваться: допускается только включать и отключать отдельные панели. Панели показаны на рис. 5 – 9, а их содержимое расшифровано в табл. 1 – 5.



Рис. 5. Панель Edit

Таблица 1. Содержимое панели Edit












Кнопка	Ярлык		Функция
	Cut	Вырезать	Вырезает выбранный объект и помещает его в буфер обмена
	Copy	Копировать	Копирует выбранный объект с помещением его в буфер обмена

Таблица 1. (окончание)

	Paste	Вставить	Вставляет содержимое буфера обмена
	Undo	Отменить	Отменяет последнюю команду
	Redo	Выполнить повторно	Выполняет заново последнюю отмененную команду
	Intersect	Пересечь	Операция булевого пересечения
	Subtract	Вычесть	Операция булевого вычитания
	Unite	Объединить	Операция булевого объединения
	Translate	Перенести	Перенос выделенных объектов
	Select object	Выбрать объект	Активизация процесса выбора объектов
	Select surface	Выбрать поверхность	Активизация процесса выбора поверхностей
	Edit Notes	Редактировать заметки	Активизация редактора заметок

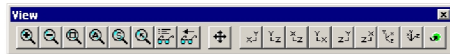


Рис. 6. Панель View

Таблица 2. Содержимое панели View








Кнопка	Ярлык	Ярлык	Функция
	Zoom in	Увеличить	Увеличение активного вида
	Zoom out	Уменьшить	Уменьшение активного вида
	Zoom view with mouse window	Увеличить в размер рамки	Масштабирование выбранной области с помощью граничной рамки
	Zoom All	Масштабировать в размер окна	Изменение масштаба всех объектов в размер окна
	Zoom to selected objects	Увеличить выбранные объекты	Изменение масштаба выбранных объектов в размер окна
	Zoom to cursor	Увеличить/Уменьшить вид	Изменение масштаба вида при перетаскивании указателя мыши
	Named Views	Именованные виды	Выбор и создание видов модели

Таблица 2. (окончание)












	Previous View	Предыдущий вид	Вызов предыдущего вида
	Pan Cursor	Перемещать	Прокручивает вид при движении указателя
	XY View	Вид XY	Поворот модели в ориентацию вида параллельно плоскости XY
	YZ View	Вид YZ	Поворот модели в ориентацию вида параллельно плоскости YZ
	XZ View	Вид XZ	Поворот модели в ориентацию вида параллельно плоскости XZ
	YX View	Вид YX	Поворот модели в ориентацию вида параллельно плоскости YX
	ZY View	Вид ZY	Поворот модели в ориентацию вида параллельно плоскости ZY
	ZX View	Вид ZX	Поворот модели в ориентацию вида параллельно плоскости ZX
	View isometric profile 1	Изометрия 1	Изометрический вид, ориентация 1
	View isometric profile 2	Изометрия 2	Изометрический вид, ориентация 2
	Orbit View	Вращать вид	Вращение вида перемещением указателя



Рис. 7. Панель Insert

Таблица 3. Содержимое панели Insert







Кнопка	Ярлык	Ярлык	Функция
	Insert Lens Element	Вставить линзу	Вставка объекта Линза
	Insert Reflector	Вставить рефлектор	Вставка объекта Отражатель
	Insert Tube	Вставить трубу	Вставка объекта Труба
	Insert Baffle Vane	Вставить отражающий конус	Вставка тонкостенного конуса
	Insert Part	Вставить объект	Вставка объекта и файла с расширением sat или om1
	Draw Cylinder	Начертить цилиндр	Вставка цилиндра с параметрами, определяемыми положением курсора

Таблица 3. (окончание)




	Draw Block	Начертить призму	Вставка призмы с параметрами, определяемыми курсором
	Draw Sphere	Начертить сферу	Вставка сферы с параметрами, определяемыми курсором
	Draw Cone	Начертить конус	Вставка конуса с параметрами, определяемыми курсором



Рис. 8. Панель Analysis

Таблица 4. Содержимое панели Analysis

Кнопка	Ярлык		Функция
	Grid Trace	Трассировка по сетке	Трассировка лучей с расположением их на сетке
	Source Trace	Трассировка от источника	Трассировка лучей, испускаемых источником
	Reverse Trace	Обратная трассировка	Трассировка лучей от поверхностей, обозначенных как Exit Surface (Поверхность выхода) к источникам света
	Ray Histories	Истории лучей	Вывод таблицы с информацией о траектории каждого луча
	Incident Ray Table	Таблица входящих лучей	Вывод таблицы лучей, входящих в поверхность
	Irradiance maps	Диаграммы освещенности	Отображение диаграммы освещенности выбранной поверхности
	Polar IsoCandela	Полярная диаграмма изокандел	Отображение диаграммы изокандел в полярных координатах
	Polar Candela Distribution	Сила света в полярных координатах	Отображение диаграммы распределения силы света в полярных координатах
	Rectangular Candela Distribution	Сила света в ортогональных координатах	Отображение диаграммы распределения силы света в ортогональных координатах



Рис. 9. Панель Tools

Таблица 5. Содержимое панели Tools

Кнопка	Ярлык		Функция
	Audit	Проверка	Анализ модели на предмет корректности данных
	Measure geometry	Измерить геометрию	Измерение расстояний и углов для геометрических объектов

Далее будут рассмотрены возможности программы в привязке к структуре меню. Мы сосредоточимся на той части возможностей, которые определяют функциональность программы как инструмента оптического анализа.

Меню Edit

Меню Edit (Редактировать) показано на рис. 10. Команды Undo (Отменить), Redo (Выполнить повторно), Copy (Копировать), Paste (Вставить), Delete (Удалить), Clear All (Очистить все) по форме и содержанию вполне традиционны. Рассмотрим специфические функции TracePro.

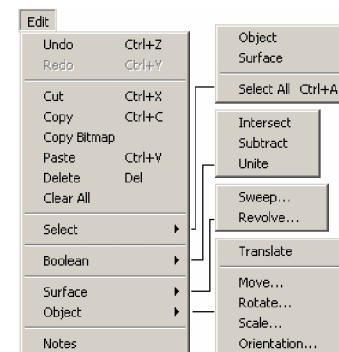


Рис. 10. Меню Edit

Select. TracePro не идентифицирует автоматически выбираемый объект. Поэтому до его указания необходимо назначить его тип. В рамках основной функциональности смысл имеют только понятия "объект" и "поверхность". Последняя – примитив, которому могут быть назначены оптические характеристики, присущие поверхностям. Самостоятельно поверхности не существуют – они должны входить в "объект". В TracePro – это одна или совокупность поверхностей, образующих твердое тело. Если выбран объект, образованный совокупностью поверхностей, то последующее присвоение характеристик, присущих именно поверхностям, будет выполняться для всех поверхностей данного объекта.

Boolean (Булева операция). Реализует булевы операции: Intersect (Пересечь); Subtract (Вычесть); Unite (Объединить). Операндами называются объекты, являющиеся телами или состоящие из поверхностей. В первом варианте действие команды вполне очевидно. Если реализуется вычитание, то второй из выбранных объектов (они активизируются указателем мыши при нажатой клавише <Ctrl>) вычитается из того, который активизирован первым. Можно применять команду к комбинации поверхностей, когда несколько поверхностей объединяются в один объект или внутри объекта – в одну поверхность. После выполнения команды информация о топологии исходных объектов пропадает.

Surface (Поверхность). Создает поверхность или тело на базе поверхности, принадлежащей объекту. Две команды Sweep (Вытянуть) и Revolve (Повернуть) позволяют создавать призматические (конические или пирамидальные) тела и тела вращения (сектора).

Object (Объект). Группа команд для перемещения/копирования объектов.

Translate (Перенести) – перенос активного объекта или группы объектов параллельно плоскости экрана. Если перенос осуществляется при нажатой клавише <Ctrl>, то объекты копируются.

Move (Переместить) – перемещение активного объекта или группы объектов. Перемещать можно в режимах:

- *Relative (Относительно)* – на величину вектора;
- *Absolute (Абсолютная координата)* – перенос центра объекта в заданную точку;
- *Distance (Расстояние)* – в направлении вектора на заданное расстояние.

Действие осуществляется после нажатия кнопок Apply (Применить) или Copy (Копировать). Очевидно, что во втором случае исходные объекты останутся на месте, а в новое положение будут вставлены их копии. Эти копии унаследуют все оптические характеристики, включая параметры источников света, которые были назначены для родительских объектов.

Rotate (Повернуть) – поворот активного объекта или группы объектов. Вращать можно (этим управляет параметр Axis) относительно осей X, Y, Z глобальной системы координат, относительно осей объекта Object X, Y, Z, а также относительно произвольного вектора – Customize.

Scale (Масштабировать) – масштабирование объекта относительно его собственного центра (опция Scale position (Центр масштабирования) неактивна) или относительно начала координат. Можно выполнить масштабирование с различными коэффициентами в направлении осей объекта или глобальной системы координат.

Меню View

Меню View (Вид) показано на рис. 11. Команды Status Bar (Строка состояния), Render (Закрасить), Hidden Line (Скрыть невидимые линии), Display ALL (Отобразить все), Named Views (Именованные виды), Previous View (Предыдущий вид), Pan (Перемещать), Zoom (Масштабировать) аналогичны имеющимся в других системах.

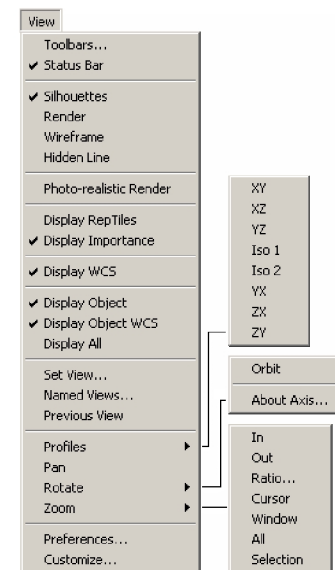


Рис. 11. Меню View

Silhouettes (Силуэт), Wireframe (Каркасное представление), Photo-realistic Render (Фотореалистичная закраска), Display RepTiles (Показать геометрию RepTiles) – режимы отображения элементов модели.

Display Importance (Показать выборку по значимости). Выводит на экран объекты, входящие в выборку по значимости. Эта выборка может быть назначена для любой поверхности командой Apply Properties | Importance Sampling. В окне модели показываются контуры областей, принадлежащих выборке, а в середине этих областей находится текст "IT".

Display WCS (Показать рабочую систему координат), Display Object WCS (Показать рабочую систему координат объекта). Вывод на экран осей системы координат, связанной с моделью и текущим объектом.

Set View (Установить вид). Настройка параметров текущего вида. Назначаются:

- Eye Position (Положение наблюдателя);
- Target Position (Положение цели);
- Up Vector (Направление вверх);
- Perspective View (Перспективный вид).

Preferences (Параметры). Параметры отображения модели и лучей по умолчанию.

Меню Insert

Меню Insert (Вставить) показано на рис. 12. Оно содержит команды создания объектов оптических систем: разнообразных линз, отражателей, твердотельных примитивов, вставки моделей TracePro, а также источников света. Меню имеет следующие команды.



Рис. 12. Меню Insert

Lens Element (Объект Линза). Создание линзы. Могут вставляться линзы, имеющие поверхности вращения, в частности, асферические и/или цилиндрические поверхности. В линзах допустимы отверстия, их можно смещать и поворачивать. Особенностью панели для линз является то, что все вкладки относятся к одному и тому же объекту. Окно содержит несколько вкладок.

Lens (Линза). Глобальные характеристики линзы. Окно вкладки содержит следующие поля:

- Units (Единицы расчета) – нужно сделать выбор между тем, как будет назначаться кривизна линзы: величиной Radius (Радиус) или параметром Curvature (Кривизна);
- группа параметров Material (Материал), включающая поля Catalog (Каталог) и Name (Название);
- две группы параметров Surface (Поверхность), определяющих тип и геометрию поверхностей линзы. Если флажок у опции Cylindrical (Цилиндрическая) отсутствует, то эта поверхность будет сферической, в противном случае цилиндрической. Геометрия сферической поверхности определяется параметрами Radius (Радиус) и Conic (Коника).

Aperture (Апертура). Параметры наружного профиля линзы.

Окно содержит следующие поля:

- Shape (Форма) – форма наружного профиля. Можно выбрать: Circle (Круг); Rectangle (Прямоугольник); Ellipse (Эллипс). Здесь следует отметить, что при моделировании линзы программа сначала строит "полный" объект в соответствии с содержимым вкладки Lens, а затем обрезает ее согласно параметрам данной вкладки (скошенные углы на иллюстрации – следствие этого алгоритма);
- Semi-Diameter X, Semi-Diameter Y (Полудиаметр X, Y). В зависимости от типа контура – полудиаметр окружности, половины сторон прямоугольника, полуоси эллипса;
- Decenter X, Decenter Y (Смещение центра X, Y) – координаты центра контура апертуры относительно исходной системы координат;
- Gamma (Гамма) – угол поворота апертуры относительно оси Z исходной системы координат.

Obstruction (Препятствие) – здесь назначаются параметры отверстия, которое программа выполняет в линзе. Все они идентичны параметрам, которые присутствуют во вкладке *Aperture*.

Position (Расположение) – положение и ориентация линзы (совместно с элементами, ее образующими) относительно начала координат. Назначаются следующие поля:

- First Surface Center (Центр первой поверхности) – группа параметров, определяющих координаты центра первой поверхности;
- Element Tilt (Ориентация элемента) – группа параметров, определяющих углы поворота линзы относительно осей системы координат, связанной с линзой. Это значит, что программа сначала перемещает линзу в заданную точку, а затем поворачивает ее относительно осей линзы.

Aspheric (Асферичность) – коэффициенты полинома, определяющего асферичность поверхностей линзы.

Fresnel Lens (Линза Френеля). Создание линзы Френеля. Диалоговое окно содержит следующие поля:

Ring width (Ширина кольца) – ширина каждого из колец, образующих преломителя. Это поле связано с полем Lines/Unit;

Lines/unit (Кольца на единицу длины) – число колец на единицу длины;

Thickness (Толщина) – полная толщина тела (включая высоту гребешков);

Outer radius (Наружный радиус) – радиус апертуры линзы;

Catalog (Каталог) – название каталога с марками материалов;

Name (Название) – марка материала;

Wavelength (Длина волны) – длина волны, на базе которой будет рассчитываться коэффициент преломления;

Object distance (Расстояние до объекта) – расстояние от объекта, излучение которого должно фокусироваться. Если объект находится в бесконечности, то следует поставить 0;

Image distance (Расстояние до образа) – расстояние до образа (точки фокуса), на котором фокусируются лучи;

Origin (Начало) – координаты исходной точки объекта. В этом качестве используется центр гладкого круга;

Rotation (Ориентация) – углы поворота объекта относительно осей исходной системы координат;

Кнопка *in Degrees/in Radians (Градусы/Радиианы)*, определяющая единицы измерения углов.

Reflector (Отражатель). Создание рефлектора. Могут вставляться отражатели, у которых отражающие поверхности являются поверхностями вращения или цилиндрическими поверхностями, имеющими в качестве образующей окружность, эллипс, круг, параболу. Генерируемые объекты являются телами. Их можно смещать и поворачивать относительно осей глобальной системы координат. Система не придает никаким поверхностям оптических свойств, поэтому их нужно назначать самостоятельно. Параметры различных типов отражателей сгруппированы во вкладки с соответствующими названиями.

Conic (Коник) – вставляется объект с гладкой с поверхностью вращения, являющейся коникой. Диалоговое окно содержит поля:

- *Shape (Форма)* – тип получаемой внутренней поверхности. Доступны: Spherical (Сферическая); Parabolic (Параболическая); Elliptical (Эллиптическая); Hyperbolic (Гиперболическая);
- *Thickness (Толщина)* – толщина объекта, получаемого приданием внутренней поверхности данной толщины;
- *Hole radius (Радиус отверстия)* – радиус отверстия в глухой части объекта;
- *Calculate (Вычислять)* – из последующих трех (для гиперболоида четырех) параметров один является избыточным. Данное поле содержит список, из которого нужно выбрать, что является зависимой (расчетной) величиной;
- *Length (Длина)* – размер внутренней образующей в направлении оси вращения;
- *Focal length (Фокусное расстояние)* – в зависимости от типа объекта может быть: для параболоида – фокусное расстояние; для эллипсоида – Focal len. 1 (Первое фокусное расстояние) и Focal len. 2 (Второе фокусное расстояние; для гиперболоида – Front (Передний) и Back (Задний));

- *Origin (Начало); Rotation (Ориентация)* – эти параметры тождественны тем, которые имеются в линзе Френеля.

Compound Trough (Составной желоб). Вставляется цилиндрический объект, состоящий из двух симметричных тел. Внутренний контур сечений может быть параболой или эллипсом. При этом сечения имеют степень свободы в направлении, перпендикулярном оптической оси. Диалоговое окно содержит следующие поля:

Shape (Форма) – тип получаемой внутренней поверхности. Доступны: Parabolic (Параболическая) и Elliptical (Эллиптическая);

Front depth (Глубина передняя), Back depth (Глубина задняя) – расстояние от фокуса до переднего и заднего торцов тела;

Lateral focal shift (Поперечное смещение фокуса) – вертикальное смещение образующей относительно исходного положения (оно характеризуется тем, что внутренние образующие обоих тел расположены на одной и той же кривой). Величина может быть положительной (смещение внутрь) и отрицательной (смещение наружу);

Thickness (Толщина) – толщина объекта, получаемого приданием внутренней поверхности данной толщины;

Length (Длина) – длина объекта;

Axis tilt (Наклон оси) – угол поворота верхней и нижней образующих относительно оси, перпендикулярной сечению и проходящей через точку пересечения образующей кривой с осью объекта. Величина может быть положительной (верхнее сечение вращается против часовой стрелки, а нижнее – в противоположном направлении) и отрицательной;

Focal length (Фокусное расстояние) – в зависимости от типа объекта может быть: для параболоида – фокусное расстояние; для эллипсоида – Focal len. 1 (Первое фокусное расстояние) и Focal len. 2 (Второе фокусное расстояние).

3D Compound (Составной 3D). Синтезируется тело вращения, образованное поворотом параболы или эллипса вокруг оси, не проходящей, в общем случае, через фокус кривой. Набор параметров, за исключением отсутствия поля *Axis tilt (Наклон оси)*, тождествен объекту Compound Trough. Эквивалентны и алгоритмы построения поперечного сечения фигур.

Rectangular Concentrator (Прямоугольный концентратор). Вставляется объект, состоящий из двух отражателей типа Compound Trough. Внутренний контур сечений может быть параболой или эллипсом. Фокусы кривых совпадают. Большинство параметров соответствующей вкладки идентичны тем, которые определяют Compound Trough. Оригинальными являются поля, характеризующие положение второго фокуса.

Faceted Rim Ray (Фасетный отражатель краевых лучей). Объект предназначен для создания отражателя, обеспечивающего равномерную освещенность плоской круглой грани под действием света, излучаемого пло-

ской же круговой поверхностью. Отражатель является гранной аппроксимацией поверхности вращения или цилиндрической поверхности. Поэтому каждая внутренняя грань (фасетка) является равносторонней трапецией (прямоугольником). Предполагается, что излучение происходит равномерно во все стороны (поле Angular Distribution вкладки Surface Source принимает значение Uniform). Следует отметить, что задача не имеет точного решения, поэтому в программе используется следующий алгоритм: проблема приводится к плоской и решается для сечения объектов плоскостью YZ, проходящей через оптическую ось. Каждая фасетка – отрезок – располагается так, чтобы луч, испущенный верхней точкой отрезка-излучателя при попадании в крайнюю левую точку фасетки, после отражения направился в нижнюю точку цели. Луч же, испущенный верхней точкой источника и направленный в крайнюю правую точку фасетки, после отражения попал в верхнюю точку отражателя. Первое условие требует подбора длины образующей, поскольку построение начинается с точки на максимальном диаметре (верхней правой). Понятно, что при равномерном излучении с поверхности каждая ее точка служит источником бесконечного числа лучей, равномерно распределенных внутри полусферы, из которых только один участвует в формировании ячейки. Окно вкладки, определяющей форму фасетного отражателя, содержит следующие поля:

Shape (Форма) – тип фигуры. Доступны: Circular (Окружность) и Trough (Желоб);

Thickness (Толщина) – толщина стенки объекта;

Facets/Row (Фасеток/Рядов) – число граней по окружности для кругового отражателя;

Length (Длина) – длина корытоподобного (Trough) отражателя;

Height (Полувисота) – половина высоты (радиус) внутренней поверхности отражателя;

Location (Положение) – координата вдоль оси Z (оптической оси) крайней правой точки (вершины) отражателя;

Source Height (Высота источника) – половина высоты (радиус) излучающей поверхности;

Source Location (Положение источника) – координата Z источника света относительно вершины отражателя. Таким образом, если источник находится внутри поверхности рефлектора, то он имеет отрицательную координату;

Target Height (Высота цели) – половина высоты (радиус) излучающей поверхности;

Target Location (Положение цели) – координата Z источника света относительно вершины отражателя. Таким образом, если источник находится внутри поверхности рефлектора, то он имеет отрицательную координату;

Origin (Начало) – координаты исходной точки объекта. В этом качестве используется центр гладкого круга;

Rotation (Ориентация) – углы поворота объекта относительно осей исходной системы координат;

in Degrees/in Radians (Градусы/Радианы) – кнопка, определяющая единицы измерения углов.

Меню Define

Меню Define (Назначить) совместно с дочерними меню показано на рис. 13.

Оно содержит команды создания объектов оптических систем: разнообразных линз, отражателей, твердотельных примитивов, вставки моделей TracePro, а также источников света. Меню имеет следующие команды.

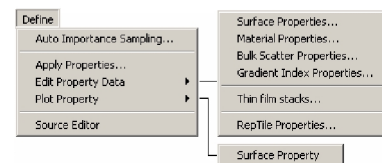


Рис. 13. Меню Define

Auto Importance Sampling (Автоматическая выборка по значимости).

Автоматическая выборка по значимости – процедура автоматизации назначения целей, определяемых последовательностью прохождения пробных лучей через оптическую систему. Эта процедура, как правило, применяется для анализа устройств детерминированной оптики: объективов, телескопов и т.д., т.е. систем, где можно прогнозировать ход каждого луча (если при этом не учитывается рассеяние). Этот прогноз включает неявную интерполяцию траекторий лучей, траектории которых лежат "между" некоторыми характерными лучами. Такого типа системы, как правило, обладают свойством осевой симметрии, а ее элементы (линзы, зеркала) не содержат составных поверхностей. Как и во всех задачах, связанных с использованием выборки по значимости, использование данной функции будет иметь смысл исключительно для оптических систем, в которых имеет место рассеяние на поверхностях. Поэтому нужно тщательно контролировать содержимое вкладки Thresholds (Пороговые значения) окна Raytrace Options (Параметры трассировки), чтобы предотвратить подавление рассеянных лучей, несущих относительно малую долю энергии.

Apply Properties (Назначить свойства). Основная панель, в которой назначаются оптические свойства объектов и источников света. Присвоить оптические свойства можно персонально для любого из них, выбрав группу од-

нородных объектов (тел или поверхностей), а также используя схему родитель-потомок. Последнее возможно исключительно для тел. Если выбрать тело (из дерева проекта или, после нажатия кнопки Select Object, в графическом окне) и попытаться присвоить поверхностные характеристики, то они будут назначены всем поверхностям объекта.

Для присвоения оптических свойств объектам используются соответствующие вкладки.

Material (Материал) – выбор материала из числа присутствующих в базе данных программы. Поля вкладки описаны далее:

- Catalog (Каталог) – список каталогов, в которых находятся марки материалов. Наиболее употребительные каталоги: SCHOTT, OHARA, HOYA, Hikari оптические стекла; PLASTIC – прозрачные пластмассы; Coating – оптические покрытия; Birefringent – двоякопреломляющие материалы. Большинство материалов содержит информацию о зависимости коэффициентов преломления и поглощения от длины волны;
- Name (Название) – марка материала, выбираемого из числа имеющихся в базе данных;
- Wavelength (Длина волны) – длина волны (мкм), для которой будет вычисляться коэффициент преломления;
- Index (Коэффициент преломления), который для данного материала берется из базы данных;
- Absorption Coef (Коэффициент поглощения) – коэффициент поглощения данного материала, вычисляемый в интервале 0...1;
- Transmission (Коэффициент пропускания) – доля светового потока, прошедшего через заданную пользователем толщину материала. Изменение длины, на которой вычисляется эта величина, не меняет собственно физические свойства материала, а служит исключительно инструментом контроля;
- Current Material on Selected Object – поле, в котором отображаются каталог, и марка материала, присвоенная данному объекту;
- кнопка Apply (Применить) – после нажатия этой кнопки характеристики выбранного материала присваиваются объекту;
- кнопка View Data (Просмотреть данные) – после нажатия кнопки выводится панель, в которой можно просматривать и редактировать параметры материала, создавать новые каталоги и материалы. При этом если были предприняты эти действия, то данный материал назначен объекту не будет. Для этого нужно воспользоваться кнопкой Apply.

Обратим внимание, что материал можно назначать только объекту (или группе объектов), причем ответственность за то, является ли объект телом, которое только и может обладать свойствами материала (преломлять, про-

пускать свет), лежит исключительно на пользователе. После назначения объекту параметров некоторого материала система не теряет связи с базой данных, т. е. изменив в базе характеристики и повторив расчет, получим новый результат. То же самое относится к свойствам поверхностей.

Surface (Поверхность) – выбор и назначение поверхности или группе поверхностей характеристик из числа присутствующих в базе данных. Поля вкладки в большинстве своем тождественны имеющимся на вкладке Material. Исключение – описательное поле Reference Data (Справочные данные) и поле Reference Material (Ссылочный материал). В этом поле назначается, будет ли влиять коэффициент преломления материала на отражающие свойства. Традиционно используются параметры воздуха с коэффициентом преломления 1.

Свойства поверхностей можно назначать как одной или нескольким поверхностям, так и объектам. В последнем случае всем поверхностям выбранного объекта будут присвоены заданные характеристики.

Просмотреть численные величины, определяющие свойства, можно, нажав кнопку View Data. В появившейся панели можно увидеть все параметры, изменить их, а также вывести информацию о других типах и марках. Если свойства изменить, то новый расчет будет выполняться на базе новых характеристик. Если в панели свойств вывести другую марку, то она не будет применена к текущей активной поверхности (поверхностям). Сделать это можно только в окне Apply Properties.

Bulk Scattering (Свойство рассеяния) – присвоение выбранному объекту параметров рассеивания. Они выбираются из номенклатуры свойств, введенных ранее. Просмотр численных величин, определяющих соответствующее свойство, производится в панели Bulk Scatter Property Editor. Назначение свойства осуществляется исключительно посредством кнопки Apply. Естественно, что присвоение свойства данного типа имеет смысл исключительно для объектов, являющихся телами.

Surface Source (Источник на поверхности) – назначение поверхности или группе поверхностей параметров источника света. Если выбрано несколько поверхностей или активизирован объект, то каждому из них будут присвоены характеристики, приведенные на вкладке. Если более конкретно, то заданная сила света не делится между всем множеством источников, а присваивается каждой из поверхностей. Здесь, кстати, следует обратить внимание, что в TracePro нет "объемных" источников излучения. Вкладка имеет следующие поля:

- Source Type (Тип источника) – можно принимать следующие значения: Flux (Поток) – в зависимости от того, в каких единицах – фотометрических или радиометрических – решается задача, имеет размерность люмены или ватты; Irradiance (Яркость) – в данном контексте это поверхностная плотность потока излучения, измеряемая в

люксах или в Вт/м²; BlackBody (Черное тело) – излучение черного тела; GrayBody (Серое тело) – излучение серого тела;

- Flux (Поток) – собственно величина параметра, тип которого определен в предыдущем пункте;
- Total Rays (Всего лучей) – число лучей, испускаемых поверхностью. Эта величина никак не связана с мощностью, т. е. можно большую мощность передать малым числом лучей и наоборот. Однако соображения здравого смысла подсказывают, что если излучающих поверхностей в модели несколько, то количество лучей (относительно других поверхностей) должно зависеть от мощности источника и, что менее значимо, площади излучающей поверхности;
- Total Power (Полная мощность) – вычисляемый параметр, характеризующий мощность источника. Он имеет смысл в ситуации, когда имеется излучение с различными длинами волн, а также если назначается плотность излучения. Тогда с учетом площади источника рассчитывается мощность, отдаваемая поверхностью. Для этого применяется кнопка Calculate Power (Рассчитать мощность);
- Wave (Длина волны), Weight (Весовой коэффициент), Power (Мощность) – параметры излучения. Содержание первых двух столбцов определяется в панели Raytrace Options, третий столбец – вычисляемый. Отметим, что весовые коэффициенты не обязаны в сумме составлять единицу. Это, однако, весьма желательно, поскольку возникает противоречие между назначенной мощностью в поле Flux и вычисленной, которая отображается в поле Power;
- Angular Distribution (Угловое распределение) – тип распределения мощности излучения в пространстве. Может принимать значения: Lambertian (Ламбертово); Normal to Surface (Нормально поверхности); Surface Absorptance (Поверхностное поглощение); Uniform (Однородное). Излучение Lambertian характеризуется распределением интенсивности по закону косинуса. Это значит, что она пропорциональна косинусу угла между нормалью к поверхности и направлением, в котором испускается энергия. Данный тип распределения, как правило, наиболее адекватно описывает излучение поверхностей накаливания. Типы Uniform и Normal to Surface в комментариях не нуждаются. Вариант Surface Absorptance предназначен для ситуации, когда излучаемость поверхности прямо связывается с ее поглощающей способностью, которая может зависеть от длины волны. Именно последний вариант может сделать данную функцию актуальной.

Exit surface (поверхность выхода). Выбранная поверхность будет использоваться для сбора данных при расчете в режиме симуляции. Это значит, что для поверхностей, у которых эта опция не активна, никакие результаты получены

быть не могут. Если поверхность назначена как поверхность выхода, то можно использовать ее как источник света для обратной трассировки. При этом следует назначить **Number of reverse rays** (Число обратных лучей), имея определенную для этой поверхности **Importance Target** (Значимая цель).

RepTile (Чешуя). "Наложение" свойств на реальные поверхности производится посредством вкладки RepTile. Вкладка содержит данные, объединенные в группы Property Data (Информация о свойствах) и Boundary and Orientation (Границы и ориентация).

Name (Название) – название свойства, выбираемого из выпадающего списка с ранее определенными свойствами RepTile. Ниже расположены два безымянных поля. Первое из них предназначено для диагностических сообщений, второе – для типа поверхности RepTile.

Surface Catalog (Каталог поверхностей) – из данного каталога будут выбираться типы поверхностей для присвоения свойств поверхностям на чешуйках. Из этого следует, что поверхностям, находящимся между и вне чешуек (последний вариант имеет место, если размеры области с геометрией RepTile меньше, чем габариты поверхности, на которую она наложена), можно присвоить параметры, отличные от чешуек.

Surface Property (Свойство поверхности) – тип поверхности, выбираемый из Каталога поверхностей и назначаемый для чешуек.

Boundary and Orientation – выпадающий список, из которого можно выбрать тип формы чешуйчатой области. Доступны Rectangular (Прямоугольная) и Circular (Круговая) области. Это значит, что произвольный плоский многоугольник не может быть однозначно описан свойством RepTile.

Размеры области, которые, в зависимости от ее формы, требуют ввода параметров Width (Ширина), Height (Высота), Radius (Радиус). Руководство пользователя рекомендует избегать ситуаций, когда виртуальная область выходит за габариты поверхности, на которую она накладывается.

Boundary Center (Центр области) – координаты центра области, занятой чешуей.

Origin for tile (0, 0) (Положение ячейки с координатами 0, 0) – координата точки, принадлежащей поверхности, в которую будет помещена чешуйка с координатами (0, 0).

Up Direction (Направление вверх) – направление вектора, определяющего верх чешуйчатой поверхности. Предполагается, что ось Z нормальна к ней и направлена вдоль хода лучей; ось Y направлена вверх; ось X ортогональна к первым двум осям с образованием правосторонней тройки векторов.

Edit Property Data (Редактировать данные о свойствах). Совокупность команд, предназначенных для создания и редактирования свойств поверхностей и материалов: Surface Properties (Свойства поверхностей); Material Properties (Свойства материалов); Bulk Scatter Properties (Характеристики рас-

сеяния); Gradient Index Properties (Характеристики переменного коэффициента преломления); Thin film stacks (Пакеты тонких пленок); RepTile Properties (Свойства чешуйчатых поверхностей). Система помещает информацию в файл формата Microsoft Access (расширение mdb) с именем traserpro, который размещается в каталоге с исполняемым файлом программы.

Surface Properties (Свойства поверхности) – создание, просмотр и редактирование характеристик поверхностей. Свойства объединяются в каталоги, причем критерии группировки всецело формулируются пользователем. Свойства можно добавлять как в уже имеющиеся в поставке программы каталоги, так и во вновь созданные. Вкладка имеет следующие кнопки и поля.

Группа кнопок вверху таблицы (без надписей). Значимой функциональностью обладают первые четыре:

- Import a property (Импорт свойства) – считывание свойства, параметры которого находятся в текстовом файле, путь к которому нужно выбрать в появившемся окне. После выбора файла свойство (если, конечно, его параметры заданы корректно) записывается в текущий активный каталог. Данная функция используется при обмене моделями между пользователями. Информация о свойствах, присвоенных объектам, не записывается в расчетную модель, а каждый раз считывается из базы данных. Поэтому при передаче моделей с оригинальными (отсутствующими в базовой поставке TracePro) свойствами следует прилагать их к модели (см. команду Export a property) и восстанавливать в базе данных;
- Export a property (Импорт свойства) – запись данных, соответствующих текущему активному свойству, в текстовый файл;
- Save the property (Сохранение свойства) – запись параметров, определяющих свойство, после редактирования в базу данных;
- Lock/Unlock the property (Заблокировать/разблокировать свойство) – запрещает или разрешает редактировать свойство. После активизации свойства его корректировка по умолчанию запрещена.

Группа кнопок Catalog включает в себя следующие:

- Add Catalog (Добавить каталог) – создание группы свойств. Понятие "каталог" здесь никак не связано с одноименным в файловой системе Windows;
- Delete Catalog (Удалить каталог) – уничтожение каталога со всеми содержащимися в нем свойствами;
- Add Property (Добавить свойство) – создание свойства, определяющего параметры поверхности.

Группа Data Points, содержащая кнопки Sort by (Сортировать по), Add (Добавить), Delete (Удалить). Эти кнопки предназначены для операций с параметрами температуры, длины волны, ориентацией осей анизотропии опти-

ческих свойств и т. д. Эти характеристики в задачах светотехники, как правило, не актуальны:

- Solve For (Решать для) – соблюдение закона о том, что совокупность долей поглощенного, отраженного, пропущенного света, а также составляющих светового потока, рассеянного при отражении и пропускании, в сумме должна быть равна единице. После нажатия этой кнопки происходит вычисление параметров, определяющих недостающий компонент. При этом введенные ранее величины теряются;
- Catalog (Каталог) – выпадающий список с названиями каталогов, имеющихся в базе данных;
- Name (Название) – выпадающий список в названиями свойств, имеющихся в выбранном каталоге;
- Description (Описание) – текстовое поле, содержащее информацию о свойстве. В расчете оно не участвует;
- Type (Тип) – способ интерполяции данных. Предусмотрены Fresnel (Френель), Table (Табличный), Stack (Слоистый), Grating (Дифракционная решетка), Anisotropic (Анизотропный) и Coating DLL (Тонкопленочный DLL) способы. Для задач светотехники применим только табличный способ, позволяющий назначить свойства в зависимости от температуры, длины волн и угла падения;
- Scatter (Рассеяние) – способ моделирования рассеяния. Варианты способов приведены выше. Тип рассеяния назначается во время создания свойства и далее его изменить нельзя;
- Retroreflector (Ретроотражатель) и Polarization (Поляризация) признаки учета соответствующих явлений.

Material Properties (Свойства материала) – создание, просмотр и редактирование характеристик материалов. Кнопки и поля имеют много общего с окном Surface Properties. В зависимости от принятого метода интерполяции коэффициента преломления как функции длины волны эти элементы могут отличаться: Interpolation (Интерполяция) – способ интерполяции. В задачах светотехники, где не учитывается связь между коэффициентом преломления и длиной волны рекомендуется выбрать значение Table (Табличный); Index Coeff (Константы для коэффициента) – имена коэффициентов полинома, описывающего зависимость между длиной волны и коэффициентом преломления; Index (Константа) – величины констант; Temperature (Температура) – температура, для которой назначаются параметры; Wavelength (Длина волны) – длина волны, для которой назначаются параметры; Index (Коэффициент преломления); Absorption (Поглощение) – коэффициент поглощения при прохождении светом пути длиной один миллиметр; Extinction (Затухание) – коэффициент затухания. Если в расчете не учитывается зависимость поглощения от длины волны, то следует назначить ноль.

Меню Analysis

Меню Analysis (Анализ) совместно с дочерними меню показано на рис. 14. Оно содержит команды для настройки параметров расчета, запуска программы на расчет и вывода результатов. Команды меню описаны далее.

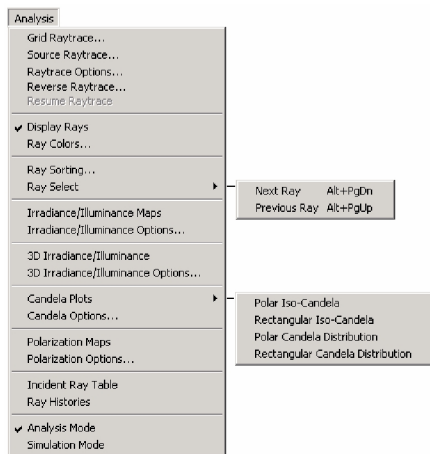


Рис. 14. Меню Analysis

Grid Raytrace (Трассировка на сетке). Создание виртуальной сетки, из вершин которой будут испускаться лучи. Это значит, что, по сути, создается источник света, не привязанный к какому-либо объекту. Настроив параметры сетки, можно, не выходя из окна, выполнить трассировку лучей. Окно содержит следующие вкладки.

Grid Setup (Настройка сетки) – назначение формы сетки, способа разбиения области, которую она занимает, параметров излучения и его направления.

Beam Setup (Настройка пучка) – определение характера распределения энергии по сечению пучка, распределение энергии пучка в пространстве и ориентации пучка.

Source Raytrace (Трассировка от источника). Трассировка лучей, идущих от источника, в качестве которого принята одна или несколько поверхностей. Процесс может выполняться в режимах **...using discrete wavelengths** (используя дискретные длины волн) и **...using continuous wavebands** (используя непрерывное изменение длины волны). Если свойства объектов, а следовательно, и результат не зависят от длины волны, то следует использовать первый режим.

Raytrace options (Настройки трассировки). Назначение параметров, определяющий вычислительный процесс и состав результатов. Окно содержит следующие вкладки.

Options (Настройки) – глобальные настройки вычислительного процесса. Вкладка имеет следующие поля и кнопки:

- **Radiometric Units** – тип единиц, используемых для исходных данных и результатов. Доступны Radiometric (Радиометрическая) и Photometric (Фотометрическая) системы единиц;
- **Ray Splitting (Расщепление лучей)** – моделирование эффектов рассеяния и разделения энергии луча при взаимодействии с поверхностью на отраженную и преломленную расщеплением лучей. Носимая этими лучами энергия будет соответствовать той, которая испускается в соответствующих направлениях. Следует активизировать этот режим при наличии в модели эффектов рассеяния, существенно влияющих на результат;
- **Specular Rays Only (Только отраженные лучи)** – отсекает лучи, несущие рассеянный свет;
- **Importance Sampling (Ray Splitting Only) (Выборка по значимости)** – активизация функции Выборка по значимости (она возможна только при учете расщепления лучей);
- **Polarization (Ray Splitting Only) (Поляризация)** – учет поляризации (возможен только при учете расщепления лучей);
- **Aperture Diffraction (Ray Splitting Only) (Апертурная дифракция)** – учет дифракции на диафрагме (возможен только при учете расщепления лучей);
- **Random Rays (Случайные лучи)** – количество случайных лучей, на которые расщепляется луч в режиме Ray Splitting в ходе рассеяния. С одной стороны, чем этих лучей больше, тем точнее расчет. С другой – если луч многократно взаимодействует с различными объектами, то общее число лучей в системе растет экспоненциально. Поэтому оптимальной величиной можно считать один или два.

Thresholds (Пороговые величины) – настройка пороговых значений, при достижении которых ход луча прекращается. Вкладка имеет следующие поля.

- **Flux Threshold (Пороговое значение потока)** – доля светового потока, несомая лучом (исходная величина равна единице), при достижении которой луч игнорируется;
- **Группа параметров Intercept Limits (Предел для числа пересечений)**, определяющая после скольких этапов взаимодействия с объектами или скольких актов рассеяния происходит прекращение распространения луча. Назначаются лимитирующие параметры: Total Intercepts (Полное число пересечений); Total Scatters (Полное число рассеяний);

Random Scatters (Полное число случайных рассеяний); Optical Scatters (Полное число оптических рассеяний).

Reverse Raytrace (Обратная трассировка). Трассировка лучей в обратном порядке. Это значит, что цель (ее поверхность) является источником лучей, после чего программа запускает их в направлении, назначенном для этой поверхности Importance Targets (Значимые цели).

Resume Raytrace (Возобновить трассировку). Продолжение трассировки лучей, если ее ход был прерван командой Cancel. Если после прекращения расчета программа была остановлена, а затем вновь запущена, то рестарт не получится.

Display Rays (Показать лучи). Демонстрация траекторий лучей после трассировки (даже если она была прервана). Состав картины и способ отображений регулируется командами View|Preferences|Ray Colors, Ray Display и Analysis|Ray Colors, Ray Display.

Ray Colors (Цвета лучей). Сопоставление доли передаваемой лучом энергии и цвета луча.

Ray Sorting (Классификация лучей). Выборка отображаемых лучей по заданным критериям. Окно команды содержит следующие поля.

Sort Type (Способ отбора) – критерий, по которому отбираются лучи для отображения. Он может принимать значения:

- All Rays (Все лучи);
- Selected Surface (Выбранная поверхность) – лучи, достигшие выбранной поверхности;
- Specular (Зеркальные) – лучи, претерпевшие зеркальное отражение;
- Single Scatter (Единичное рассеяние) – лучи, претерпевшие единичное рассеяние;
- Multiple Scatter (Множественное рассеяние) – лучи, претерпевшие более чем одно рассеяние.

Wavelength (Длина волны) – отображение лучей, несущих заданную длину волны.

% Starting Rays to Display (% от числа испущенных лучей) – отображение назначенной доли лучей, выраженной в процентах от числа испущенных. Эта опция чрезвычайно полезна для обеспечения наглядности картинки.

Flux Display Range (as a fraction of Peak Flux) (Диапазон мощности потока в долях от исходного потока) – отображение лучей, несущих заданный интервал интенсивности светового потока. Интервал определяется параметрами max (максимум) и min (минимум).

Update (Обновить) – регенерация изображения в соответствии с назначенными параметрами.

Ray Select (Выбор луча). Отображение луча, выбираемого из таблицы Ray History Table (Таблица истории лучей).

Irradiance/Plumiance map (Диаграмма облученности/освещенности). Вывод на экран диаграммы освещенности/яркости для выбранной поверхности. Множественный выбор объектов процедура не допускает. Если активна опция View|Preferences|Update analysis after selection change, то после активизации другой поверхности происходит автоматическое обновление диаграммы. В противном случае нужно использовать команду Refresh (Обновить).

Irradiance/Plumiance options (Настройки диаграммы облученности/освещенности). Выбор типа выводимых результатов и способа их отображения. Окно имеет следующие поля.

Quantities to plot (Отображаемые значения) – выбор типа отображаемых результатов. Доступны Irradiance (Освещенность), Radiance (Яркость), CIE (x,y) и CIE (u1,v1) (Диаграмма МКО Международной комиссии по освещению).

1/2 angle for radiance (1/2 угла) – величина пространственного угла для расчета яркости объекта в заданном направлении.

Rays to plot (Выводить лучи) – выбор типа лучей, формирующих картину освещенности. Доступны Absorbed (Поглощенные) и Incident (Входящие) лучи. Например, если выбрана первая группа и нас интересует освещенность идеально прозрачной поверхности, то эта освещенность будет равна нулю, поскольку поглощение отсутствует.

Normalize to emitted flux – нормализует величину потока, попавшего на поверхность, относительно суммарной величины потока, излучаемого всеми источниками. Эта опция полезна для вычисления коэффициента полезного действия оптической системы.

Set Max/Min (Установить макс/мин) – настройка границ отображаемого интервала для выводимой функции.

Smoothing (Сглаживание) – сглаживание изображения с использованием кривой гауссова распределения.

Contour Plot (Контурная диаграмма) – изображение в виде изолиний. При его активизации автоматически включается режим сглаживания.

Local Coordinates (Локальные координаты) – признак того, отображается диаграмма в системе координат модели или в системе координат грани.

Gradient Display (Плавное изображение) – сглаживание перехода между цветами на палитре и, соответственно, на диаграмме. Влияет исключительно на эстетические параметры картинки.

Convert to foot-candles (Преобразовать в кандели на квадратный метр).

Log Scale (Логарифмический масштаб) – приведение шкалы на палитре к логарифмическому масштабу.

Relief Plot (Пространственная диаграмма) – отображение графика в виде пространственной диаграммы.

Profiles (Сечения) – отображение сечений диаграммы парой ортогональных плоскостей, проходящих через заданную точку.

Map Count (Единиц на диаграмме) – число ячеек на диаграмме вдоль каждого из направлений. При отсутствии сглаживания программа усредняет результат в пределах каждой ячейки. Если же используется сглаживание, то параметр определяет степень сглаживания.

Resolution (Разрешение) – определяет размер сетки, используемой для сглаживания.

Symmetry (Симметрия) – учет вероятной симметрии при отображении диаграммы. TracePro не контролирует наличие симметрии, поэтому данная опция действует исключительно на результат, усредняя соответствующие параметры согласно выбранной схеме. Эта схема должна соответствовать наличию соответствующей симметрии геометрии и оптических характеристик. Контроль за этим всецело возлагается на пользователя. Доступны следующие типы усреднения:

- None (Отсутствует);
- Left/Right (Лево/Право) - усредняются результаты, относящиеся к левой и правой половинам области;
- Up/Down (Верх/Низ) – усредняются результаты, относящиеся к верхней и нижней половинам области;
- Quadrant (Квадрант) – комбинация двух предыдущих методов.

Rotational (Осевая) – усреднение величин, находящихся на одинаковом расстоянии от центра диаграммы.

Color Map (Цветовая палитра) – доступны различные варианты цветного и черно-белого изображения.

Contour Levels (Число контуров) – число уровней на контурной диаграмме.

Normal Vector (Вектор нормали) – координаты вектора нормали к поверхности, для которой отображается результат. Если поверхность криволинейная, то она проецируется на плоскость, перпендикулярную этому вектору.

Up Vector (Вектор вверх) – вектор, определяющий ориентацию поверхности относительно направления вверх на диаграмме. Он будет поставлен в соответствие направлению Y на диаграмме.

Automatic calculation (Автоматическое вычисление) – автоматическое вычисление нормального вектора и вектора, определяющего соответствие верха диаграммы и направления на модели.

Интерпретация результатов на основе этой и других диаграмм есть весьма нетривиальное занятие. Варьирование параметров Smoothing, Map Count и Symmetry может приводить к качественному изменению картины освещенности.

3D Irradiance/Illuminance (3D-облученность/освещенность). Визуализация светового потока, попавшего на поверхности объекта, с отображением модели в трехмерном виде. Визуализация объекта в целом или выбранных

поверхностей с закраской поверхностей, зависящей от плотности светового потока, попавшего на эти поверхности. При анализе картинки следует быть внимательным, поскольку вид закраски определяется исключительно плотностью потока, на него попавшего, а не яркостью, т. е. не зависит от положения наблюдателя. Визуализация выполняется без шкалы, т. е. числовые величины недоступны.

Candela Plots (Диаграммы силы света). Отображение распределения силы света. Доступны следующие типы диаграмм:

Polar Iso-Candela (Полярные изоканделы);

Rectangular Iso-Candela (Ортогональные изоканделы);

Polar Candela Distribution (Полярное распределение силы света);

Rectangular Candela Distribution (Ортогональное распределение силы света).

Candela Options (Настройки диаграммы силы света). Окно, содержащее настройки для определения ориентации системы координат диаграмм относительно модели, а также параметры самих диаграмм в зависимости от их типа. Окно имеет следующие вкладки.

Orientation and Rays (Ориентация и лучи) – параметры, связывающие систему координат модели и систему координат диаграммы. Вкладка содержит следующие поля:

- Normal Vector (Вектор нормали) – направление, определяющее "ось" пространственного угла, для которого отображается распределение силы света;
- Up Vector (Вектор вверх) – направление вектора, выходящего из начала координат, который соответствует вертикали на диаграмме;
- Ray Selection (Выбор лучей) – выбор категории лучей, порождающих световой поток для отображения на диаграмме. Доступны следующие поля:
 - Use missed rays for Candela Data (Использовать ушедшие лучи для диаграммы силы света) – диаграмма формируется на основе информации о световом потоке, который покинул оптическую систему;
 - Use exiting rays from selected surface (Analysis Only) (Использовать лучи, вышедшие из выбранной поверхности, только в режиме Анализа) – диаграмма формируется на основе информации о световом потоке, который излучен выбранной поверхностью. В понятие «излучен» включено отражение, преломление, рассеяние, т.е. любые способы взаимодействия света с поверхностью;
 - Use incident rays from selected surface or Exit Surface (Использовать лучи, попавшие на выбранную поверхность выхода) –

диаграмма формируется для светового потока, попавшего на выбранную поверхность;

- Symmetry (Симметрия) – учет вероятной симметрии при отображении диаграммы. Возможности аналогичны одноименной опции в панели Irradiance/Illuminance options.

Polar Iso-Candela (Полярные изокандели) – параметры диаграммы силы света на сетке с полярными координатами. Поля на диаграмме, за исключением параметра Angular width (Угловой размер), аналогичны присутствующим на вкладке Irradiance/Illuminance options.

Rectangular Iso-Candela (Ортогональные изокандели) – параметры отображения диаграммы силы света на сетке с ортогональными координатами. Оригинальные относительно предыдущих диаграмм поля таковы:

- Plot (3D-диаграмма) – отображение диаграммы поверхностью в пространстве;
- Angle convention (Соглашения об углах) – смысл угловых величин. Можно выбрать следующие:
 - Orthogonal angles (Ортогональные углы) – углы, отсчитываемые в ортогональной неподвижной системе координат;
 - Type A Goniometer, Type B Goniometer – углы, измеряемые в системах координат, которые связаны с гониометрами типов А и В.

Candela Distributions (Распределение силы света). Настройки для диаграмм, отображающих распределение силы света в виде кривых в полярных или ортогональных координатах. Эти кривые, по сути, являются сечениями диаграмм, рассмотренных выше. Поля, отличные от диаграмм изокандел, таковы:

cd/klm – масштабирование шкалы силы света относительно 1000 лм;

Number of horizontal angles (Число горизонтальных углов) – число сечений пространственного угла плоскостями, проходящими через ось;

Luminaire format (Светотехнический формат) – отображение диаграммы в формате, принятом в светотехнике;

3D Plot (3D-диаграмма) – отображение диаграммы поверхностью в пространстве;

Angular width (Угловая ширина) – размер пространственного угла, из которого собирается информация для диаграммы.

Закрывая рассмотрение диаграмм изокандел, обратим внимание на то, что эти графики для коллимированных источников света бессмысленны (поскольку весь световой поток направлен вдоль одной линии), причем это не зависит от площади пучка. Для узких же пучков (направленных в малый пространственный угол) они не слишком достоверны, поскольку требуют большого числа испускаемых лучей.

Polarization Maps (Диаграмма поляризации). Отображение эллипса поляризации.

Polarization Options (Настройки поляризации). Настройки для диаграммы поляризации.

Incident Ray Table (Таблица входящих лучей). Таблица, содержащая информацию о лучах, попавших на выбранную поверхность. Доступны номер луча, длина волны, "передаваемый" лучом световой поток, координаты начала и конца, другие параметры. Выбранный луч можно визуализировать. Наиболее важная функция данной таблицы – создание виртуального источника света. Он "аккумулирует" лучи, прошедшие через выбранную поверхность. Лучи экспортируются в текстовый файл командой File|Save as, после чего источник (фактически те же лучи) импортируются в модель командой Insert|Source.

Ray Histories (Истории лучей). Таблица, содержащая траекторию луча с информацией о каждом из его отрезков. Выбор луча в таблице осуществляется посредством соответствующих кнопок.

Analysis Mode (Режим анализа). Выполнение трассировки в режиме анализа. Это позволяет иметь в качестве результата всю расчетную информацию.

Simulation Mode (Режим симуляции). Выполнение трассировки в режиме симуляции. Это позволяет иметь в качестве результатов только часть расчетных данных, состав которых определяется настройками. Эти недостатки компенсируются сокращением запросов к оперативной памяти.

Меню Reports

Меню Reports (Отчеты) показано на рис. 15. Оно содержит команды для вывода интегральной информации о свойствах объектов, числовых параметрах светового потока и протокол использования ресурсов аппаратуры.

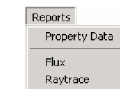


Рис. 15. Меню Reports

Property Data (Информация о свойствах). Вывод сводной таблицы, содержащей информацию о свойствах, присвоенных каждому из объектов модели, включая параметры поверхностей этих объектов.

Flux (Поток). Вывод сводной таблицы, содержащей информацию о результатах взаимодействия светового потока с каждым из объектов модели (включая детализацию по поверхностям). Выводятся следующие величины:

Surface Area (Площадь поверхности);

Number of rays (Число лучей) – число лучей, попавших на поверхность;

Incident (Входящий) – световой поток, попавший на объект;
Absorbed (Поглощенный) – световой поток, поглощенный при взаимодействии с объектом;

Lost (Потерянный) – поток, потерянный при взаимодействии с объектом с покомпонентным отображением.

Raytrace (Трассировка). Протокол использования аппаратных средств: информация о времени счета, задействованной оперативной и виртуальной памяти.

Меню Tools

Меню Tools (Инструменты) с раскрытием некоторых команд показано на рис. 16. Оно содержит вспомогательные команды для анализа полноты модели, измерений, некоторые опции для модификации геометрии.

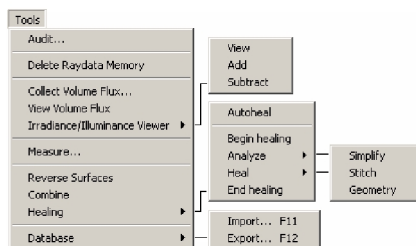


Рис. 16. Меню Tools

Audit (Аудит). Проверка расчетной модели на предмет присутствия в базе назначенных ее элементам оптических свойств. Если эта команда не вызвана в явном виде, то перед началом трассировки она запускается автоматически. Далее, в ходе трассировки в окне Message/Macro (Сообщения/Макро) отображается протокол аудита.

Delete Raydata Memory (Удалить из памяти информацию о лучах). Освобождение оперативной памяти, занятой данными о лучах. Рекомендуется выполнить, если результат трассировки принципиально не устраивает пользователя. Одновременно будет ликвидирован доступ ко всем диаграммам, графикам и т. д.

Collect Volume Flux (Собрать поток в объеме). Создание виртуальной сетки из параллелепипедов для сбора информации о распределении светового потока.

View Volume Flux (Отобразить поток в объеме). Визуализация распределения светового потока в некотором параллелепипеде, на который была наложена сетка.

Irradiance/Illuminance Viewer (Просмотр диаграмм облученности/освещенности). Просмотр Irradiance/Illuminance maps (Диаграмм облу-

ченности/освещенности), записанных ранее в файл. Можно объединить информацию из двух диаграмм посредством команд Add (Сложить) и Subtract (Вычесть). Настройки диаграмм при их совместном отображении подчиняются определенным правилам.

Measure (Измерить). Измерение расстояний между характерными элементами объектов. Доступны отдельные объекты и их пары:

Vertex – Vertex (Вершина – вершина);

Vertex – Edge (Вершина – кромка);

Vertex – Surface (Вершина – поверхность);

Edge – Edge (Кромка – кромка);

Edge – Surface (Кромка – поверхность);

Surface – Surface (Поверхность – поверхность).

Reverse Surface (Развернуть поверхность). Разворот нормали к поверхности. Как правило, нормали к поверхностям, ограничивающим тело, направлены наружу. В некоторых ситуациях, когда тело, не ограниченное в пространстве, имеет полость, необходимо указывать это обстоятельство посредством данной команды.

Combine (Объединить). Создание объекта из совокупности других объектов, имеющих поверхностное представление. Программа соединяет все поверхности выбранных объектов в один объект, а затем пытается создать из него тело. В случае успеха (факт этого никак не диагностируется) после присвоения объекту материала он будет восприниматься программой как тело, т.е. иметь возможность преломлять, поглощать и рассеивать свет. Данная команда может быть полезна при импорте геометрии, которая в исходном состоянии не являлась твердым телом или же не была воспринята TracePro как тело. Во избежание потерь времени на дальнейшие безрезультатные манипуляции, следует сразу после модификации объекта присвоить ему свойства прозрачного материала, провести трассировку нескольких лучей и установить факт наличия преломления. Если оно отсутствует, то исходной информации недостаточно для формирования тела. Причины традиционны: наличие щелей, перекрытие кромок, перехлестывание граней.

Healing (Лечение). Совокупность команд для автоматического изменения дефектной геометрии. Зачастую импортированные объекты, в частности, имеющие твердотельное представление, содержат дефекты геометрии: узкие, накладывающиеся или пересекающиеся грани, несшитые поверхности и т. д. Причина здесь может быть как субъективная – некорректные действия пользователя при создании исходной геометрии, – так и объективная – несоответствие точности представления геометрии в графической и в расчетной средах. Некоторые ошибки, в общем, мало влияют на результат: в процессе трассировки производится отсечение лучей, которые встречают проблемные элементы. Негативным следствием этого факта является замедление расчета из-

за того, что обработка лучей в проблемных зонах затруднена, а также непрогнозируемая потеря точности (которая, скорее всего, не слишком значима). Хуже, однако, если объект, представлявший в исходной CAD-системе твердое тело, в TracePro в качестве такового не воспринимается. По этой причине он может преломлять свет и обладать другими оптическими характеристиками, присущими телу. С определенной вероятностью нивелировать эти проблемы может использование перечисленных далее команд.

Autoheal (Автоматическое лечение) – последовательное применение операций, описанных ниже. Перед подачей команды следует выбрать объект, содержащий проблемные поверхности.

Begin/End healing (Начать/Закончить лечение) – эти команды необходимо подать перед началом выполнения команд лечения и после того, как операции выполнены.

Heal (Лечить) – команды модификации модели. Доступны следующие операции:

- **Simplify (Упростить)** – упрощение геометрии с целью приведения объекта к канонической форме с учетом некоторой (программно-определенной) погрешности. Например, сфера, имеющая "точное" представление в CAD-системах, в TracePro может (с не слишком большой, но ненулевой вероятностью) быть воспринята как сплайновая поверхность. Это повлечет усложнение расчета и создаст систематическую ошибку в результатах. Справедливо и обратное утверждение: незначительные отклонения от канонической формы могут присутствовать в модели вполне целенаправленно (например, асферичность в линзах). Есть вероятность того, что они исчезнут после применения данной команды к подобному объекту;
- **Stitch (Сшить)** – соединение граней, которые должны (с учетом некоторой погрешности) иметь некоторую кромку;
- **Geometry (Геометрия)** – недокументированная, но, вероятно, полезная опция.

Analyze (Проверить) – команды для проверки наличия в объекте дефектов. Рекомендуется использовать их перед подачей команд на изменение геометрии.

Database (База данных). Экспорт/импорт свойств, присутствующих в модели. Необходимость использования этой процедуры порождена тем, что в файл модели записывается исключительно информация о присвоении объектам неких свойств, но не их содержание.

Меню Macros

Меню Macros (Макрос) содержит команды для создания, просмотра и выполнения макрокоманд, записанных на языке Scheme.

3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ АНАЛИЗА

Подготовка геометрической модели

Рассмотрим процедуру передачи геометрии из CAD-системы в TracePro. Общими форматами для TracePro и CAD-систем являются STEP, IGES и др. Каждую из деталей транслируется индивидуально. Иногда визуально линии пересечения граней выглядят неопределенными. Это значит, что смежные кромки поверхности общими на самом деле не являются. Они или перехлестываются (как, судя по всему, происходит в данном случае), или образуют зазор. Такая геометрия для оптического анализа непригодна. Используем функциональность TracePro для лечения импортированных объектов.

В меню Tools | Healing последовательно подаем команды:

1. **Begin Healing (Начать лечение).**
2. **Stitch (Сшить).**
3. **Geometry (Геометрия).**
4. **End Healing (Закончить лечение).**

Команда Simplify подгоняет поверхности под канонические. Последствия ее применения предсказать достаточно трудно.

Единственным объективным критерием "твердотельности" объекта в TracePro является восприятие его системой в этом качестве. Для данной программы – это формирование траектории луча с учетом преломления. Вставляем в модель некий объект, например, призму, располагая ее так, чтобы одна из граней проецировалась, например, на линзовые элементы. После этого делаем эту грань источником света с ориентацией лучей нормально грани. Выполним трассировку лучей, убеждаемся, что преломление имеет место.

После считывания файлов деталей в TracePro и последующей их обработки создаем на их базе файлы с расширением oml. Затем, открыв новый файл TracePro, переносим в него эту информацию посредством команды Insert | Part.

Назначение оптических характеристик

Последовательно активизируем объекты в Дереве проекта, назначая оптические характеристики материалам и/или поверхностям.

1. **Светодиод.** Всем его поверхностям присваиваем свойство поверхности Perfect Absorber (Абсолютное поглощение). По этой причине материал можно оставить неопределенным.
2. **Волновод и коллиматор.** Материал (полиметилметакрилат) выбираем из базы TracePro. Сложнее с характеристиками объемного

рассеяния. TracePro не предоставляет практически ничего подходящего для этого случая. Данные параметры подбирались на основе анализа совокупности экспериментов над изделиями, изготовленными из аналогичных материалов.

3. Корпус и отражатели. Поскольку он имеет поверхностное представление, назначать материал бессмысленно. Поверхности можно разделить на две группы: имеющие зеркальные свойства и матовые зеркала. Эти свойства присваиваем поверхностям отражателей и корпуса. База данных TracePro содержит большое число различных типов зеркал.

Назначение источников света

Источником света назначаем плоскую поверхность тела, имитирующего светодиод. В качестве закона распределения силы света в пространстве выбираем ламбертовское распределение.

Параметры вычислительного процесса

Данная задача характеризуется высокой вычислительной трудоемкостью. Это обусловлено, в частности, наличием множества сплайновых поверхностей, а также достаточной степенью вложенности объектов и существенным (предполагаемым) влиянием процессов рассеяния на результат. Продолжительность расчета может составить несколько часов. Поэтому уделяем достаточное время настройке вычислительного процесса. Подаем команду Raytrace Options (Параметры трассировки) и переходим на вкладку Options (Настройки). Здесь активизируем опцию Ray Splitting (Расщепление луча), что, несмотря на рост объема вычислений и необходимой памяти, способствует более точному воспроизведению явлений рассеяния.

На вкладке Thresholds (Пороговые значения) настраиваем параметры так, чтобы, с одной стороны, компоненты рассеянного света "потерялись" бы только после того, как они перестали нести достаточную по сравнению с "прямыми" лучами долю энергии, а с другой стороны, сохранили размерность задачи в разумных пределах. Здесь важно такое соображение. Если бы нас интересовала освещенность или сила света вне планируемой рабочей зоны (например, анализировались паразитные эффекты в оптических приборах), то лучи следовало бы оставить более "жизнеспособными".

Представление результатов

Подбор параметров отображения диаграмм освещенности, силы света – весьма неоднозначная проблема.

На воспринимаемый результат влияют, во-первых, параметры расчета и, во-вторых, то, как численный результат преобразуется в диаграмму. Факторы, влияющие на видимый результат, – Smoothing, Map Count, Symmetry. Можно указать некоторые принципы их использования:

- для систем с дискретным изменением освещенности исследуемых объектов предпочтительны диаграммы без сглаживания;
- если оптическая система обладает симметрией, то этот факт нужно использовать на этапе интерпретации результатов;
- чем больше число лучей, тем большее значение параметра Map Count обеспечивает картину, адекватную реальности;
- однозначные рекомендации по подбору параметров диаграммы отсутствуют. Необходимо последовательно увеличивать Map Count до тех пор, пока флуктуации не станут оказывать влияние на результат.

4. РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4.1. Неколлимированный ввод излучения от светодиода в волновод

Рассмотрим способы ввода излучения в волновод толщиной 3-8 мм, имеющий показатель преломления в диапазоне $n = 1,3 \dots 1,7$, от светодиода с размером светящегося тела квадратной формы $0,96 \times 0,96$ мм.

Модель ввода излучения в волновод с помощью одного внутреннего конуса

Рассмотрим другие способы ввода излучения в толстый волновод.

На рис. 17 приведена схема ввода излучения в толстый волновод. В волноводе толщиной H просверлено коническое отверстие с телесным углом θ глубиной h , диаметром D . Показатель преломления в волноводе n .

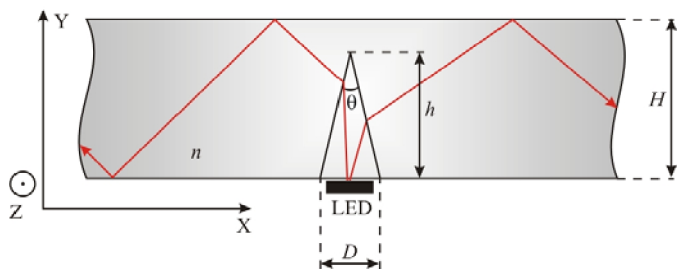


Рис. 17. Схема конического отверстия для ввода излучения в волновод от протяженного светодиода

Диаметр отверстия зависит от размера светящегося тела светодиода и выбран $D = 1,6$ мм. Таким образом, допустимая неточность установки светодиода в плоскости XZ по центру отверстия будет равна $0,1$ мм.

В табл. 6 приведены результаты расчета и моделирования отверстия под различные показатели преломления волновода. Значение η – КПД ввода излучения в процентах от полной энергии светодиода. Диаграмма направленности светодиода принята за ламбертовскую. При расчетном показателе преломления все выходящее из светодиода излучение вводится в волновод или отражается обратно в сторону светодиода, никакое излучение не проходит наружу из волновода вверх (рис. 17). Толщина волновода должна быть не ме-

нее глубины h , n_c – расчетный показатель преломления, для которого схема ввода работает оптимально, n_{used} – показатель преломления, для которого рассчитано значение η . Здесь и далее закрашенные серым цветом ячейки в столбце η указывают на выход излучения в области ввода сверху волновода. Незакрашенные ячейки η свидетельствуют о том, что никакое излучение не выходит сверху волновода в области ввода.

Таблица 6. Зависимость параметров отверстия в волноводе от показателя преломления

n_c	n_{used}	h , мм	θ , °	η , %
1,5	1,5	7,7	12	99,5
	1,4			86,5
	1,3			63,9
1,6	1,6	3,9	23	99,6
	1,5			94,3
	1,4			79,2
	1,3			59,5
1,7	1,7	2,7	33	99,0
	1,6			96,8
	1,5			86,1
	1,4			71,5
	1,3			52,7

Для показателя преломления $n = 1,41$ и менее рассчитать такую схему принципиально нельзя для любой толщины волновода – КПД почти в 100 % будет недостижим, так как часть излучения обязательно будет выходить сверху волновода. В табл. 6 приведены размеры глубины отверстия h , а результаты моделирования справедливы для любой толщины волновода $H > h$.

Модель ввода излучения в волновод с помощью двух конусов

Результаты в табл. 6 можно улучшить, если изменить верхнюю поверхность волновода в месте ввода. На рис. 18 показан внешний вид такого волновода применительно для толщины волновода 3 мм. В табл. 7 представлены результаты моделирования ввода света в волновод от светодиода. Нанесение зеркального покрытия на верхний конус улучшает результат (табл. 8).

Для показателя преломления $n = 1,3$ (толщина волновода 3 мм) можно достичь КПД 83,1 %, а при напылении зеркального покрытия на верхний конус – 98,0 %.

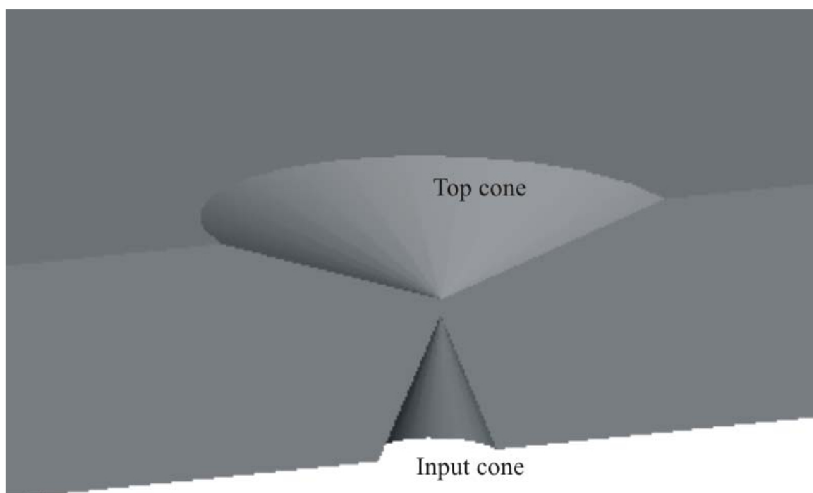


Рис. 18. Внешний вид волновода с добавлением конуса сверху

Таблица 7. Результаты моделирования волновода, изображенного на рис. 5

n	$\eta, \%$
1,3	75,2
1,4	94,5
1,5	98,6
1,6	98,4
1,7	98,0

Таблица 8. Результаты моделирования волновода зеркальным покрытием на верхнем конусе

n	$\eta, \%$
1,3	86,8
1,4	96,2
1,5	98,6
1,6	98,4
1,7	98,0

В случае более толстого волновода легче получить лучший результат. В табл. 9 приведены результаты моделирования волновода толщиной 8 мм с той же оптической схемой.

Таблица 9. Зависимость КПД ввода излучения от показателя преломления n для волновода толщиной 8 мм

n	$\eta, \%$
1,3	98,1
1,4	99,6
1,5	99,4
1,6	99,3
1,7	99,1

Необходимо отметить, что оптимальными данными являются данные в табл. 6 для схемы, изображенной на рис. 17 (схема с одним конусом). Оптимизацию двухконусной схемы (рис. 18) необходимо проводить, зная следующие параметры: толщину волновода; показатель преломления волновода; размер светящегося тела светодиода, неточность монтажа светодиода в плоскости XZ и по оси Y.

При расчете одноконусной схемы в табл. 6 был взят малый запас угла θ (1°) и как следствие – глубина отверстия h минимальна. Поэтому если конус будет создан сверлением волновода, необходимо обратить внимание на гладкость поверхности конуса – шероховатости по оси Y (кольцевые полоски после некачественного сверла) могут привести к выходу излучения сверху волновода при эксплуатации схемы на расчетных показателях преломления и высоты h . Поэтому если угол при бугорках шероховатости составит $0,5^\circ$ и более, рекомендуется уменьшить угол θ и как следствие, увеличить глубину конуса h . Небольшая шероховатость на поверхности конуса в плоскости XZ (канавки вдоль оси конуса) не критична.

В обеих схемах светящаяся поверхность светодиода была взята в нижней плоскости волновода. При изготовлении схемы рекомендуется немного заглублять светодиод внутрь конуса. При этом незначительно возрастет КПД (примерно на $0,1...0,2\%$) и исключится возможность увидеть светодиод под острым углом к внешней поверхности волновода (если схема работает без выхода лучей из внешней поверхности волновода в области ввода). Глубина заглубления светодиода в волновод не критична.

При взятии светодиода квадратной формы излучение в волновод вводится одинаково равномерно по всем направлениям в плоскости XZ.

Ввод излучения в волновод от цветного сборного светодиода

Рассмотрим ввод излучения в волновод толщиной 3-9 мм от цветного комбинированного светодиода. Для этого будем использовать источники трех типов: бескорпусной Golden Dragon с размером светящегося тела $0,96 \times 0,96$ мм, комбинированный светодиод CLS размером $2,1 \times 2,1$ мм со све-

тящимися телами размером 1,0×1,0 мм и корпусной светодиод Golden Dragon LED. Светодиоды Golden Dragon LED 0,96×0,96 мм будут ставиться по 4 штуки, общий размер сборки бескорпусных Golden Dragon LED с учетом неплотного прилегания примем 1,95×1,95 мм. Материал волновода: PMMA.

Длины волн излучения светодиодов (и соответствующие им показатели преломления волновода из материала PMMA) являются: синий (469 мкм) – $n = 1,497$, зеленый (525 мкм) – $n = 1,495$, красный (617 мкм) – $n = 1,49$.

Ввод излучения от сборки CLS и бескорпусных Dragon LED

В связи с близостью геометрических параметров сборки бескорпусных Dragon LED и CLS рассмотрим их вместе.

Рассмотрим ввод излучения в волновод толщиной 3 мм. На рис. 19 представлен вид области ввода излучения в волновод в разрезе для светодиодов.

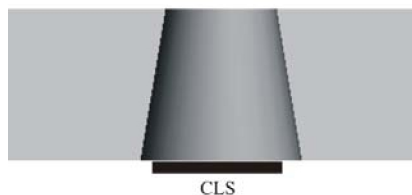


Рис. 19. Вид волновода для ввода излучения от светодиодов в разрезе

Как видно из рис. 19, область ввода представляет собой сквозное конусное отверстие, к большему диаметру которого приставлен светодиод. Полная эффективность ввода излучения с площадки CLS размером 2,1×2,1 мм составляет 85,4 %. Эффективность ввода излучения от 4 Dragon LED составляет 87,6 %. В табл. 10 приведены КПД ввода обеими схемами на рис. 19 для разных длин волн.

Таблица 10. Зависимость КПД ввода от длины волны излучения для CLS и Dragon LED

λ , мкм	η для CLS, %	λ , мкм	η для Dragon LED, %
465	85,1	469	87,7
523	85,4	525	87,6
625	84,9	617	87,2

Как видно из табл. 10, эффективность ввода излучения почти не меняется с изменением длины волны (КПД меняется менее чем на 0,5 %). Поэтому в дальнейшем будем рассматривать КПД ввода на одной длине волны 523 мкм.

В табл. 11 приведены сводные данные по КПД ввода для схем с разной толщиной волновода.

Таблица 11. Сводные данные по КПД ввода различными схемами

№	Type of LED	Толщина волновода, мм	η , %
1	CLS	3	85,4
2	Dragon	3	87,6
3	CLS	6	95,7
4	Dragon	6	96,2
5	CLS	9	98,4
6	Dragon	9	98,5

Как видно из табл. 11, схемы под Dragon LED дают несколько большую эффективность ввода, чем CLS в связи с меньшим размером светящегося тела (1,95×1,95 против 2,1×2,1 мм). Чем толще волновод, тем меньше разница в КПД между Dragon LED и CLS.

При дальнейшем увеличении толщины волновода эффективность ввода будет по-прежнему возрастать. Однако, поскольку уже при ее толщине 9 мм достигнут КПД ввода около 98 %, дальнейшее увеличение КПД будет не более чем на 1,5 %.

Рассмотрим равномерность ввода излучения по разным направлениям внутри волновода. На рис. 20 показана схема ввода излучения в волновод в плоскости волновода.

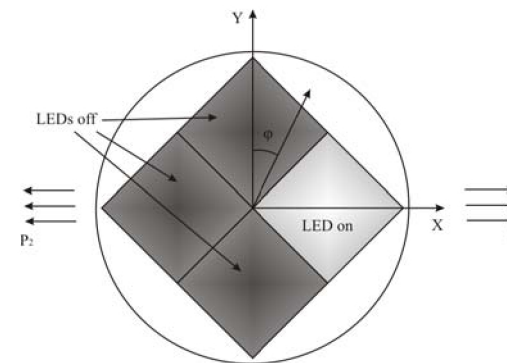


Рис. 20. Схема ввода излучения в волновод

Пусть один диод в сборке работает, остальные выключены. Тогда в плоскости XY будет сформирована диаграмма направленности излучения одного цвета – распределение мощности в направлении под углом φ к оси Y. На рис. 21 представлена диаграмма направленности для случая рис. 20 (Dragon LED, толщина волновода 3 мм) для диапазона углов $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$.

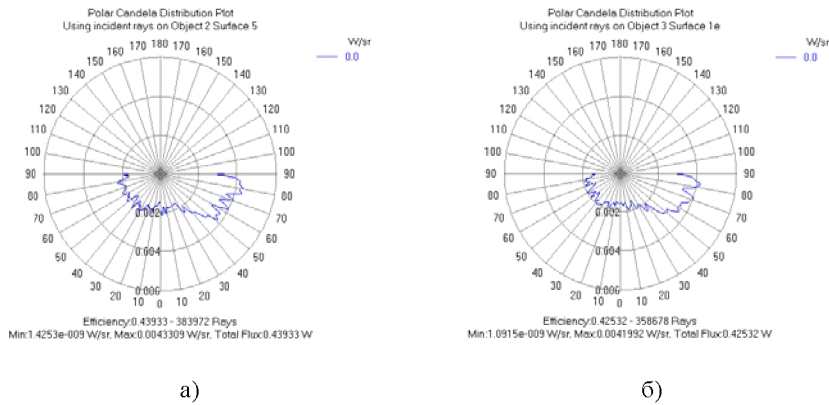


Рис. 21. Диаграмма распределения мощности в волноводе толщиной 3 мм при использовании одного светодиода в сборке: а) Dragon LED; б) CLS

Сборки диодов Dragon LED и CLS имеют примерно одинаковую геометрию, вследствие чего диаграммы распределения интенсивности излучения от угла в плоскости волновода схожи. Можно увидеть, что в направлении оси X (рис. 20) энергии P_1 идет больше, чем P_2 в противоположном направлении. Это объясняется тем, что в связи со смещением светодиода от центра большую часть диаграммы направленности улавливает ближайшая к светодиоду часть конуса, находящаяся над ним. В данном случае при использовании схемы с Dragon LED толщиной 3 мм неравномерность составляет $Q = \frac{\max(P_1, P_2)}{\min(P_1, P_2)} = 1.84$.

Для более равномерного введения света можно использовать цилиндр с внутренними отражательными стенками, как показано на рис. 22.

Цилиндр D имеет внутренний диаметр равный входному диаметру конусного отверстия волновода и ставится вплотную к нему. Светодиод помещается внутрь цилиндра на расстоянии S от плоскости волновода. Отражение лучей от ближайшей к светодиоду внутренней поверхности цилиндра будет способствовать переходу их на противоположную сторону конусного отверстия в волноводе. На рис. 23 показана зависимость неравномерности Q от расстояния S . График строился по схеме №2 (табл. 11).

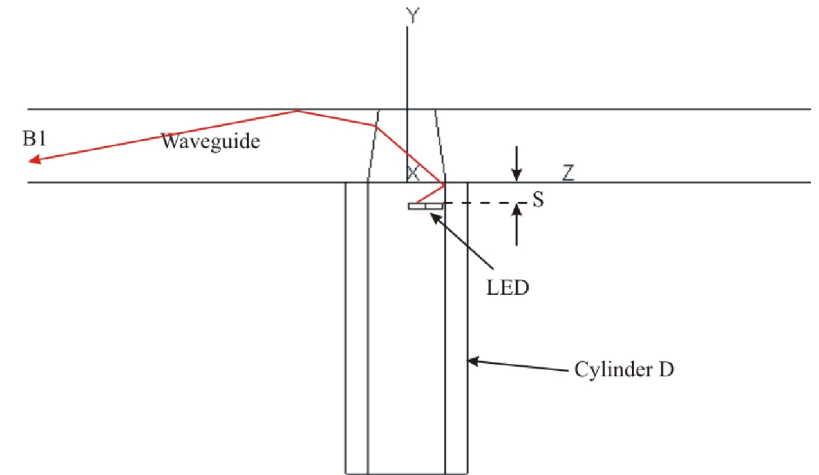


Рис. 22. Схема ввода излучения в волновод с использованием отражательного цилиндра

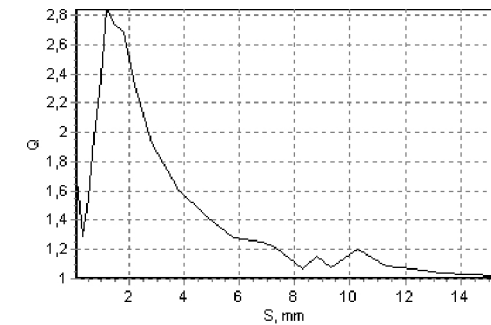


Рис. 23. Зависимость неравномерности Q от расстояния S между светодиодом и волноводом для схемы №2

Как видно из графика, чем больше расстояние, тем меньше неравномерность Q . Эффективность ввода почти не изменится при увеличении расстояния S . При построении графика расчет неравномерности производился по формуле $Q = \frac{\max(P_n)}{\min(P_n)}$, $n = 1, \dots, N$, где P_n – интенсивности распространения энергии в направлении n , всего использовалось количество направлений $N = 8$. Большие значения Q в диапазоне в начале графика, до $S = 8$ мм, обу-

словлены неравномерностью в направлениях P_1 и P_2 , как показано на рис. 20, то есть в данном случае в направлении P_2 энергии идет гораздо больше. Далее, скачки значений Q обусловлены неравномерностью распространения света в бока (отношение интенсивности света по оси X к интенсивности по оси Y на рис.20). Как видно из графика, наилучшие значения получаются при $S = 8,3$ мм, 9,3 мм, 11-15 мм. Чем больше расстояние S , тем меньше скачки функции Q и тем лучше равномерность ($Q \rightarrow 1$).

На рис. 24 представлены диаграммы распределения интенсивности излучения внутри волновода для расстояний $S = 6, 8,3$ и 10 мм.

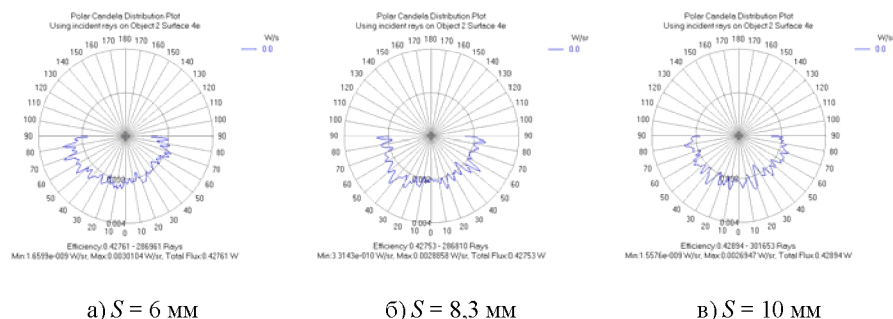


Рис. 24. Диаграммы распределения интенсивности внутри волновода для расстояний S : а) 6 мм; б) 8,3 мм; в) 10 мм

Изрезанность кривой диаграммы направленности на рис. 24 объясняется ее построением по трассировке отдельных лучей.

В табл. 12 показана зависимость неравномерности излучения Q при расстоянии $S = 8$ мм (схема на рис. 22). Можно увидеть, что изменение длины волны в пределах, заданных цветной сборкой светодиодов, практически не влияет на неравномерность Q . Это объясняется тем, что показатель преломления материала волновода (PMMA) почти не меняется в данном диапазоне длин волн.

Таблица 12. Зависимость неравномерности от длины волны при схеме №2 при расстоянии $S = 8$ мм

λ , МКМ	Q
465	1,15
523	1,15
625	1,16

В связи с этим можно рассчитывать неравномерность схемы на одной средней длине волны, что будет впоследствии справедливо для всех используемых длин волн.

Неравномерности схем для одной толщины волновода (№1 и 2, 3 и 4, 5 и 6; табл. 11) практически идентичны, что связано с небольшим расхождением геометрических параметров между ними.

На рис. 25 показана зависимость неравномерности Q от расстояния S для волновода толщиной 6 мм (схема для CLS № 3, табл. 11).

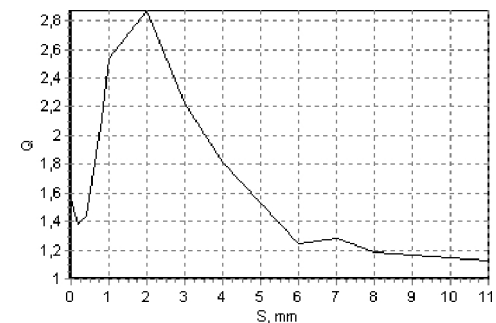


Рис. 25. Зависимость неравномерности Q от расстояния S для схемы №3

На графике (см. рис. 25) прослеживается та же тенденция. Наилучшая равномерность излучения достигается или при близком и точно отстроенном расстоянии $S = 0,3-0,35$ мм, или при $S > 6-7$ мм.

На рис. 26 показана зависимость неравномерности Q от расстояния S для волновода толщиной 9 мм (схема для CLS №5, табл. 11).

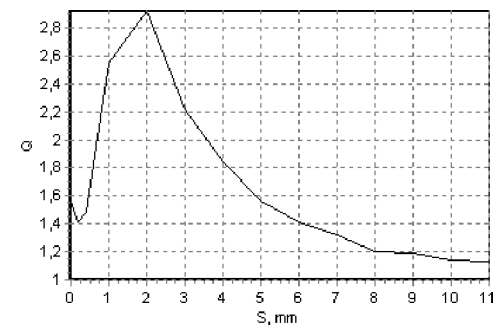


Рис. 26. Зависимость неравномерности Q от расстояния S для схемы №5

Можно увидеть, что график на рис. 26 почти не отличается от графика рис. 25. Наиболее оптимальные параметры $S = 0,3$ мм, $S > 7-8$ мм.

Для примера на рис. 27 приведена диаграмма распределения интенсивности для $S = 8$ мм (схема №5 в табл. 11).

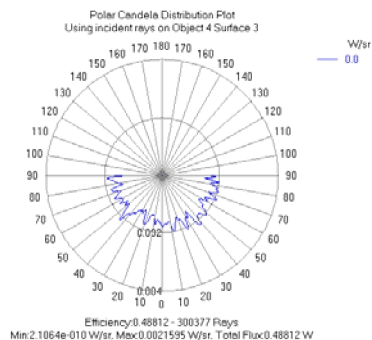


Рис. 27. Диаграмма распределения интенсивности излучения при $S = 8$ мм, схема №5

Ввод излучения в волновод от корпусных Golden Dragon LED

Рассмотрим ввод излучения от корпусных Dragon LED (рис. 28).

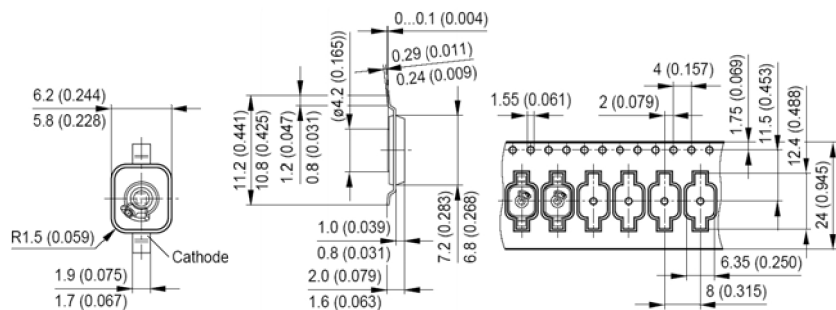


Рис. 28. Геометрические размеры Dragon LED

Из рис. 28 видно, что светодиод можно ставить вплотную горизонтально (вертикальными боками) и на некотором расстоянии между корпусами по вертикали. Такой отступ необходим в связи с наличием контактов, выходящих из боков корпуса. Учитывая это, получим расстановку 4 Dragon LED, как показано на рис. 29.

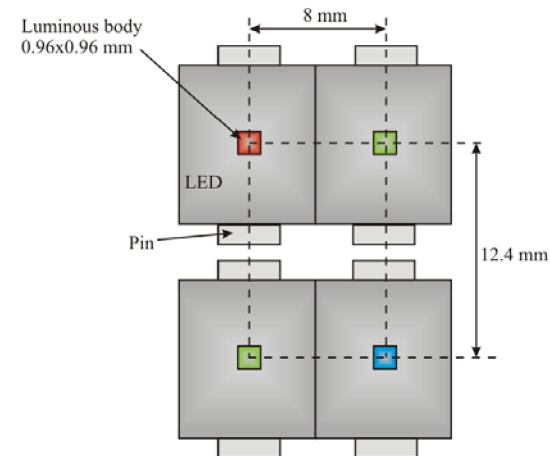


Рис. 29. Схема установки Dragon LED в плоскости волновода

Как видно из рис. 29, при изготовлении одной области ввода на четыре Dragon LED необходимо делать ее размером примерно $13,4 \times 9$ мм. Это будет оправдано только при толстых волокнах. Однако, так как источники света будут гораздо меньше всей области ввода и будут находиться ровно на ее краях, неравномерность ввода излучения по разным направлениям в волноводе будет существенной. Второй вариант – сделать четыре области ввода отдельно под каждый светодиод. Преимущество этого варианта – существенно большая эффективность ввода света, однако области ввода будут по некоторым направлениям затенять друг друга.

Рассмотрим второй вариант.

В табл. 13 приведены данные по названиям схем области ввода и их эффективность для разной толщины волновода. Нумерация схем продолжает табл. 11.

Таблица 13. Схемы и даваемые ими КПД ввода для разной толщины волновода

№	Тип светодиода	Толщина волновода, мм	η , %
7	1 Dragon	3	96,5
8	1 Dragon	6	99,5
9	1 Dragon	9	99,6

На рис. 30 представлен внешний вид волновода с четырьмя областями ввода под каждый отдельный светодиод, два из них представлены в разрезе.

КПД схем ввода на сборку из 4 Dragon LED приведены в табл. 14.



Рис. 30. Внешний вид волновода с четырьмя областями ввода

Таблица 14. Эффективность схем ввода для 4 Dragon LED

№	Тип светодиода	Толщина волновода, мм	η , %
10	4 Dragon	3	94,0
11	4 Dragon	6	98,9
12	4 Dragon	9	99,5

Как можно увидеть из табл. 13 и 14, эффективность ввода для схем с четырьмя областями ввода ниже, чем для одной, хотя геометрические параметры схем ввода для каждой толщины волновода идентичны. Это объясняется тем, что введенное излучение, столкнувшись с другой областью ввода, отчасти выходит обратно из волновода, вверх него или вниз, в сторону другого светодиода. Часть излучения при этом отражается от области ввода и продолжает движение внутри волновода. При этом за областью ввода образуется зона тени данного светодиода. Это проиллюстрировано на рис. 31.

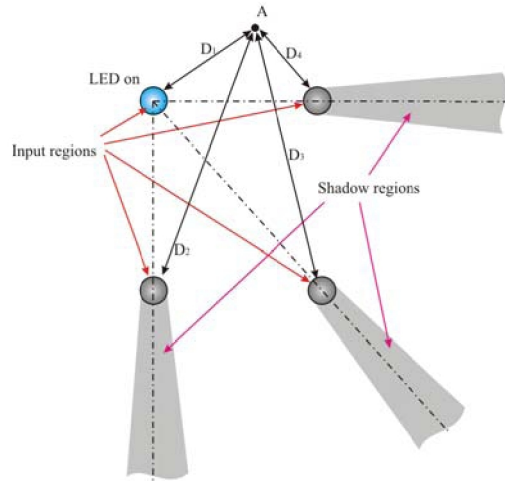


Рис. 31. Образование теней за областями ввода каждого светодиода

Затенение тем больше, чем толще волновод, в связи с большей относительной площадью поперечного сечения конусных отверстий для ввода излучения от другого светодиода. За счет затенения одного из цветных светодиодов цвет распространяемого излучения в области тени будет не такой, как в области, откуда «видны» все области ввода, без затенений. Кроме этого, за счет четырех отдельных областей ввода с относительно большим расстоянием между ними в каждую точку волновода (например, точка A на рис. 31) излучение будет приходить с разных сторон, что возможно создаст трудности для последующего коллимированного вывода излучения из волновода. По той же причине различными будут и расстояния D между точкой наблюдения A и отдельными областями ввода (рис. 31), что создаст дополнительную цветовую неравномерность излучения, находящегося в волноводе вблизи областей ввода. Чем дальше от светодиода, тем меньше будут относительные различия между расстояниями $D_1 \dots D_4$, и тем более равномерной будет цветность.

Устойчивость схем ввода к технологическим погрешностям

Рассмотрим устойчивость схем ввода (рис. 32), представленных в табл. 11, с увеличенной апертурой ввода света от светодиода к технологическим ошибкам. Расстояние ОМ принято 1,68 мм, то есть зазор между углами светодиода и стенками конусного отверстия при установке светодиода вплотную ($S = 0$ мм) к волноводу составит 0,195 мм (9,28 % от размера светодиода). На рис. 33 представлены графики зависимости эффективности ввода от угла θ .

На рис. 34 представлена зависимость эффективности ввода от расстояния S (рис. 32) при отсутствии цилиндрического отражателя, изображенного на рис. 22. Отрицательное расстояние S означает, что светодиод углубляется в конусное отверстие в волноводе.

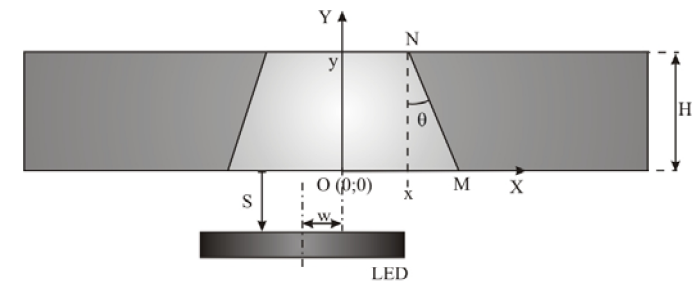
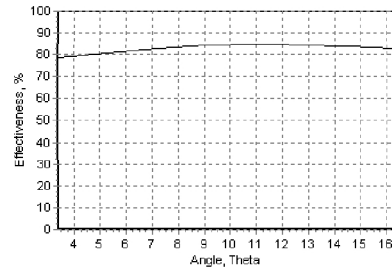
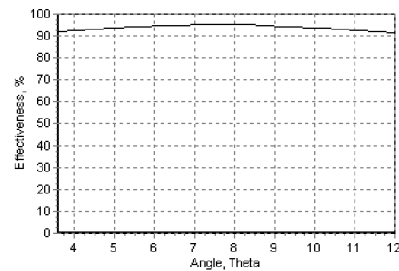


Рис. 32. Схема ввода света в волновод

а) $H = 3 \text{ мм}$



б) $H = 6 \text{ мм}$



в) $H = 9 \text{ мм}$

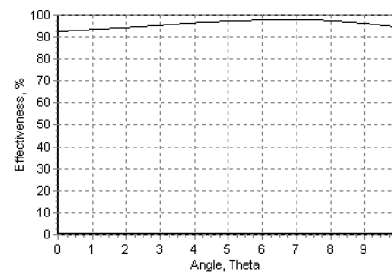


Рис. 33. Графики зависимости эффективности ввода от угла θ для толщины волновода: а) 3 мм; б) 6 мм; в) 9 мм

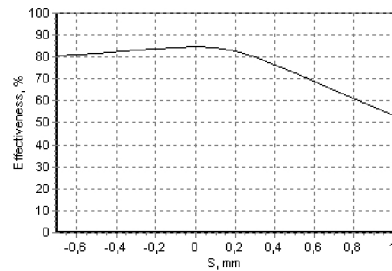


Рис. 34. Зависимость КПД ввода от расстояния S для схемы №13

При углублении светодиода внутрь конусного отверстия эффективность ввода падает. Это обусловлено приближением светодиода к верхнему отверстию в области ввода, что уменьшает засветку стенок конуса. При более толстом волноводе (№15) при заглублении светодиода в конусное отверстие КПД ввода падает медленнее, что можно увидеть на рис. 35.

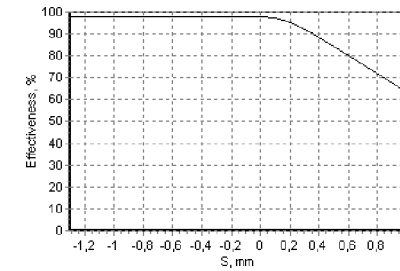


Рис. 35. Зависимость КПД ввода от расстояния S для схемы №15

Зависимости эффективности ввода от удаления светодиода от волновода ($S > 0$) схожи в случае схем №13 и 15 ($H = 3 \text{ мм}$ и $H = 9 \text{ мм}$). В случае углубления светодиода в волновод эффективность ввода в случае более толстого волновода убывает медленнее, чем в случае более тонкого.

Рассмотрим зависимость эффективности ввода от смещения центра светодиода от оси симметрии отверстия w вдоль плоскости волновода (рис. 32). В табл. 15 приведена зависимость эффективности ввода от смещения w .

Таблица 15. Зависимость КПД ввода от смещения w

w , мм	Схема №13	Схема №13
	η , %	η , %
0	84,70	98,09
0,1	84,67	98,10
0,15	84,61	98,09

Из табл. 15 видно, что эффективность ввода не зависит от малого смещения светодиода вдоль плоскости волновода.

Неравномерность ввода излучения по разным направлениям в волноводе при смещении w также изменяется незначительно. Так, при $S = 0$ и максимальном смещении w от центра области ввода неравномерность излучения может измениться на 7-10 %. При расположении светодиода внутри цилиндрического зеркала и расстоянии $S > 7-9 \text{ мм}$ (рис. 22) при максимальном смещении w неравномерность изменяется в ту или иную сторону всего на 1-3 %.

4.2. Расчет коллимирующей структуры светодиода для устройства задней подсветки

Светящаяся поверхность белого светодиода Nichia представлена ламбертовым распределением угловой интенсивности осветителя прямоугольной формы размерами $1,9 \times 0,45$ мм. Свет, излучаемый светодиодом, распространяется в коллиматоре размерами $10 \times 3,5$ мм через его переднюю поверхность. Для эффективной передачи энергии толщина коллиматора должна быть больше, чем толщина светодиода, или равна последней, а также меньше или равна толщине волновода. Толщина коллиматора была выбрана равной толщине волновода – $0,5$ мм. Светодиод расположен в центре коллиматора. Противоположная поверхность коллиматора имеет структурный рельеф, который служит для коллимирования света вдоль оси x . Затем свет должен пройти через переднюю поверхность волновода с размерами 10×40 мм и толщиной $0,5$ мм. Материал коллиматора и волновода – ПММА с показателем преломления $n = 1,493$. В модели задачи расстояние от коллиматора до светодиода принималось равным $0,1$ мм. Схема рассматриваемой задачи показана на рис. 36.

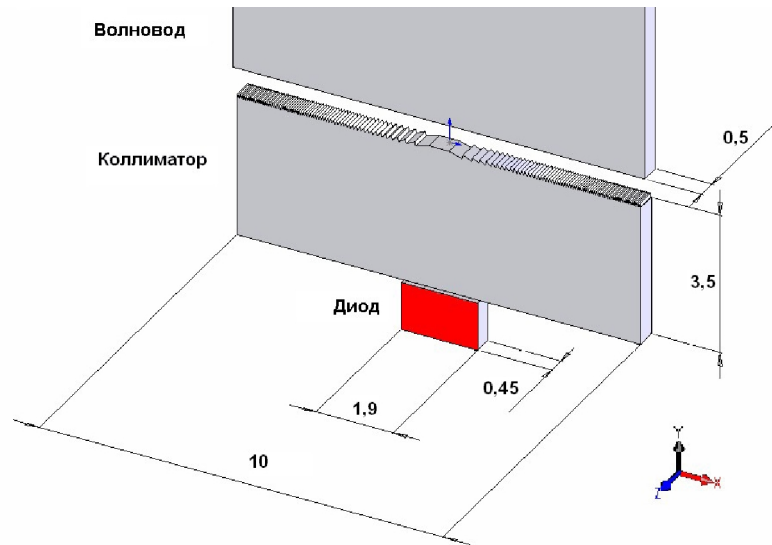


Рис. 36. Схема задачи

Светодиод, коллиматор и волновод покрываются двумя отражающими плёнками с коэффициентом отражения 99 % для того, чтобы минимизировать потери энергии в местах контакта частей схемы. Требуется рассчитать микроструктурированный профиль на передней противоположной стороне колли-

матора для получения целевых параметров: ширина на полувысоте (ШНП) углового распределения интенсивности в плоскости xu в волноводе равна 20° или меньше на оси x , заданный минимум равномерности интенсивности в волноводе 80 %, заданный минимум эффективности ввода 80 %.

Расчёт рельефа микроструктуры коллиматора длиной 3,5 мм

Кривизна поверхности рельефа рассчитывалась из следующих условий: Ось N расположена на расстоянии d от передней грани коллиматора, приставленного к светодиоду, и параллельно передней грани. При моделировании расстояние d предполагалось равным $3,5$ мм. Ось симметрии S проходит через центр светодиода и направлена перпендикулярно передней грани коллиматора (рис. 37). Углы α_{1in} и α_{2in} для лучей 1_{in} и 2_{in} , распространяющихся от краёв светодиода, определяются для некоторой точки на оси N (рис. 38). Угол α наклона поверхности микроструктуры в данной точке определяет углы α_{1out} и α_{2out} преломлённых лучей 1_{out} и 2_{out} . Заданная точка расположена на расстоянии ds от оси S .

Угол рефракции α выбран из условия равенства углов рефракции α_{1out} и α_{2out} . Далее рассчитывалась зависимость угла наклона рельефа α на оси N от расстояния ds данной точки до оси симметрии S . Используя эту зависимость, был получен исходный непрерывный рельеф (рис. 39).

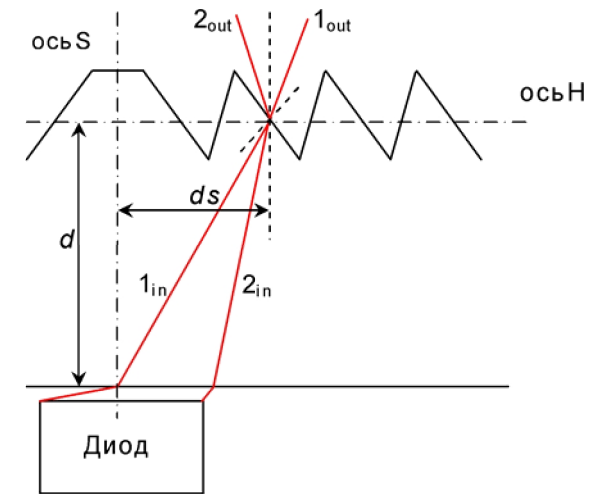


Рис. 37. Расчёт профиля коллиматора

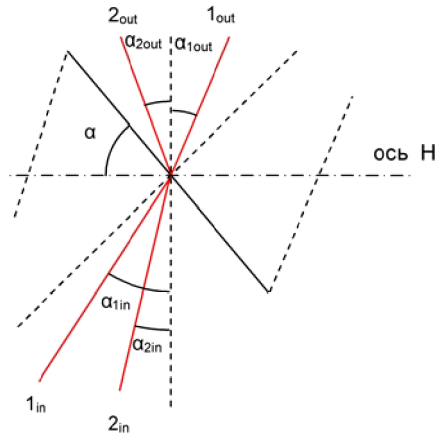


Рис. 38. Рефракция лучей на микроструктуре

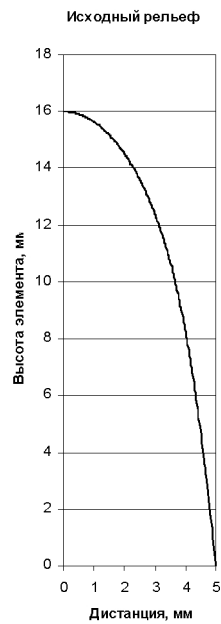


Рис. 39. Исходный непрерывный рельеф (показана половина)

Высота и характеристические размеры коллимирующей микроструктуры должны быть значительно больше, чем длина волны красного цвета, для того, чтобы избежать дифракционных эффектов и цветовой дисперсии света от белого светодиода. Для того чтобы реализовать микрорельеф, исходный непрерывный рельеф аппроксимировался линиями и дискретизировался по высоте 0,1 мм. Рассчитанная форма поверхности рельефа высотой 0,1 мм представлена на рис. 40. Рисунок разбит на интервалы в 1 мм для удобства представления.

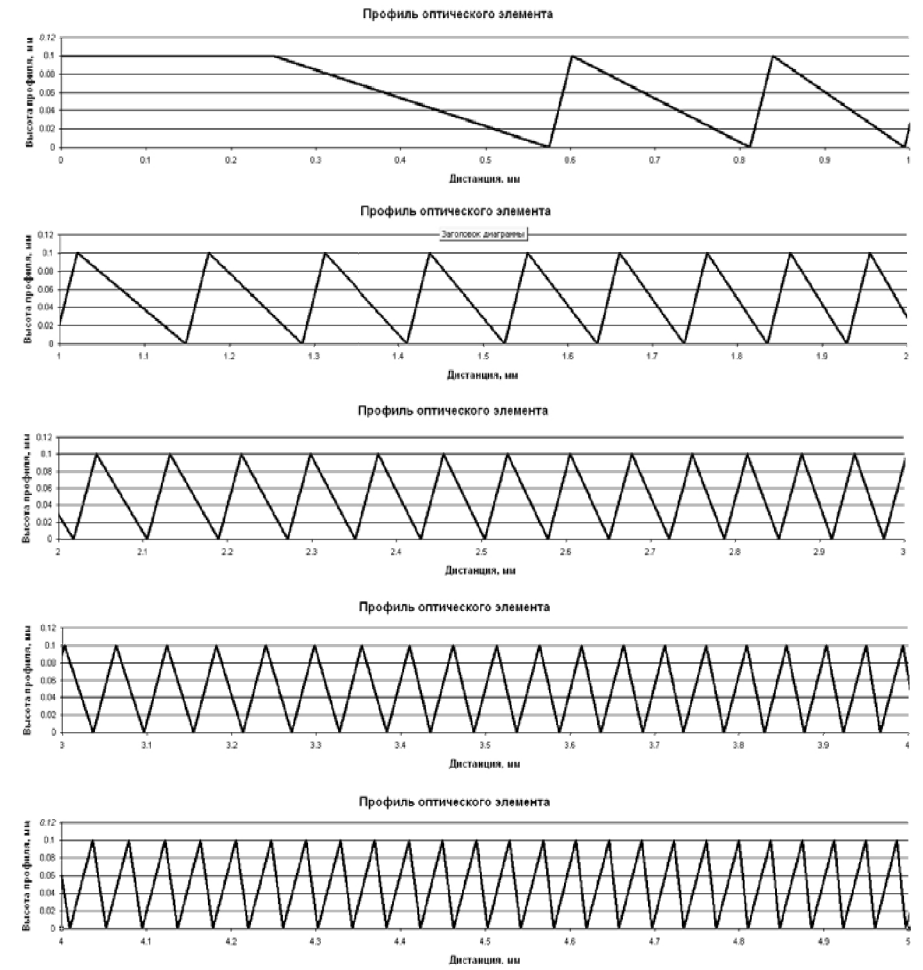


Рис. 40. Дискретизированный профиль оптического элемента

Моделирование при помощи TracePro осуществлялось трассировкой 20000 лучей. Угловое распределение интенсивности света, прошедшего переднюю грань волновода, показано на рис. 41. Представлены два типа распределения: 0° – угловое распределение интенсивности в плоскости yz и 90° – угловое распределение интенсивности в плоскости xz . Ниже используется только угловое распределение интенсивности в плоскости xz . ШНП распределения соответствует 29° ($\pm 14,5^\circ$). КПД ввода в волновод равен 75,9 %. При анализе распространения лучей было обнаружено, что лучи с большими углами падения в плоскости yz могут испытывать полное внутреннее отражение на микроструктуре и могут быть перенаправлены назад в светодиод. Такой тип распространения уменьшает долю света, вводимого в волновод.

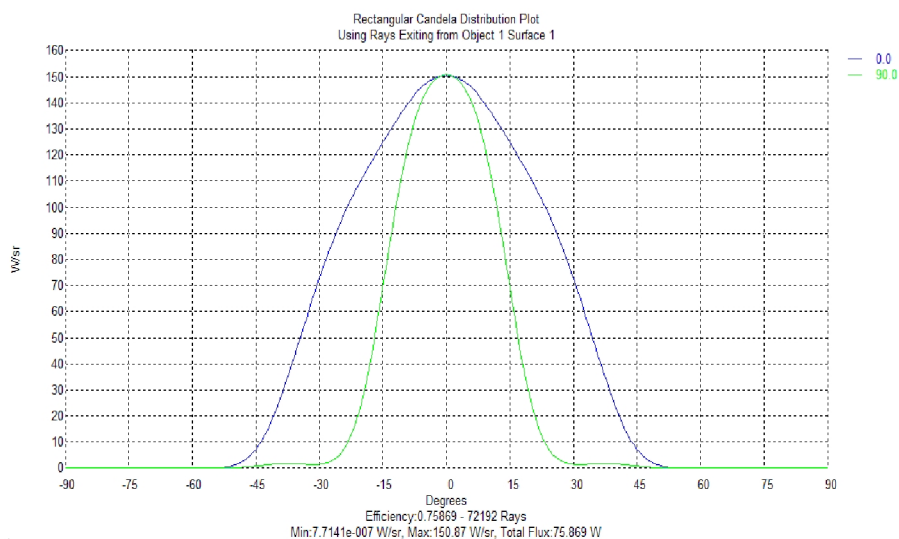


Рис. 41. Угловое распределение интенсивности

Распределение интенсивности на поверхности волновода показано на рис. 42. Распределение интенсивности на передней грани волновода на расстоянии 3,5 мм от светодиода показано на рис. 43. Распределение интенсивности на передней грани волновода на расстоянии 5 мм от светодиода показано на рис. 44.

Равномерность распределения интенсивности по волноводу составила 76,5 %. Равномерность распределения интенсивности по передней поверхности волновода на расстоянии 3,5 мм от светодиода равна 26 %. Равномерность распределения интенсивности на передней поверхности волновода на расстоянии 5 мм от светодиода равна 28,9 %.

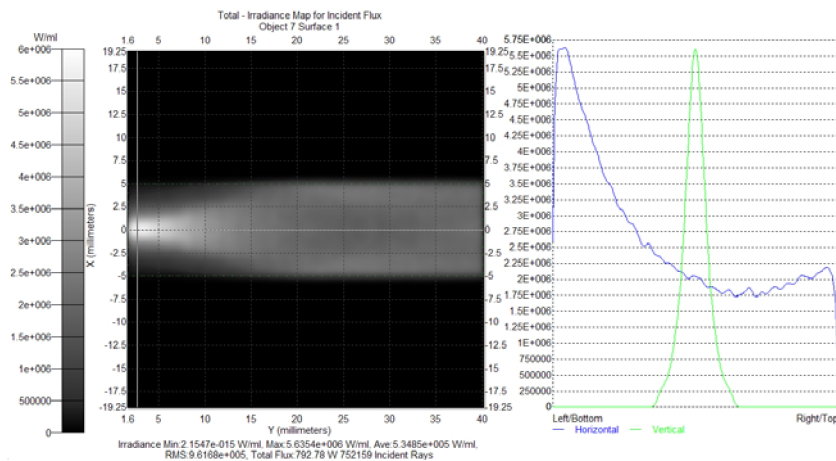


Рис. 42. Распределение интенсивности в волноводе

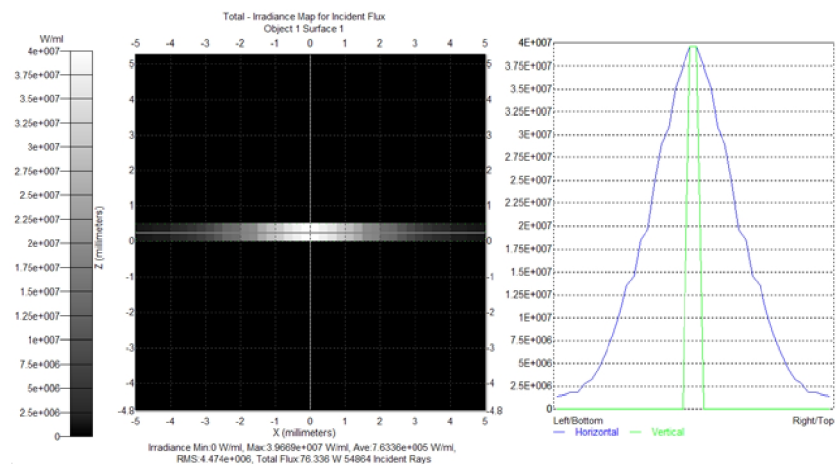


Рис. 43. Распределение интенсивности на передней поверхности волновода (на расстоянии 3,5 мм от светодиода)

Невысокая равномерность объясняется низким распределением энергии по направлению от центра коллиматора к его краям с учётом ламбертовского углового распределения интенсивности светодиода. Действительно, данная геометрия микроструктуры не может обеспечить распределение света от центра к краям.

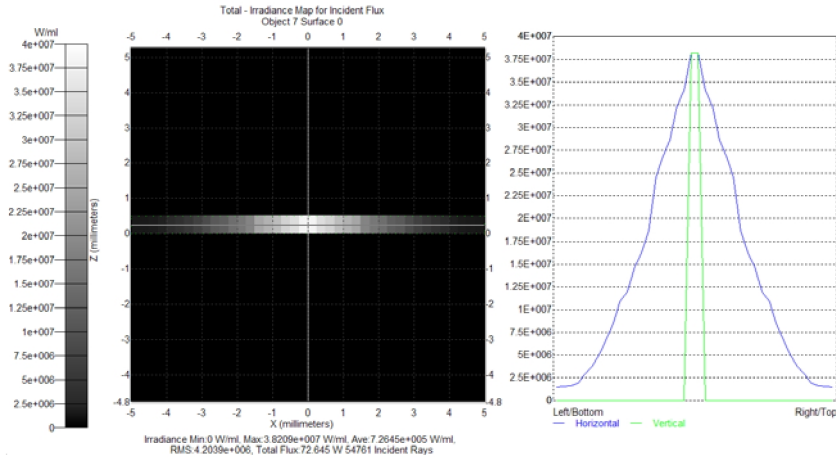


Рис. 44. Распределение интенсивности на передней поверхности волновода (на расстоянии 5 мм от светодиода)

Оптимизация КПД ввода

Профиль рельефа модифицировался с целью увеличения ШНП интенсивности углового распределения до значения $\pm 20^\circ$. Это позволило увеличить долю света с высокими углами отклонения к плоскости ху, который может распространяться в волноводе. Непрерывный рельеф дискретизировался с шагом 0,1 мм отрезками. Рассчитанная форма поверхности высотой 0,1 мм показана на рис. 45. Такую структуру легче изготовить благодаря большим углам призм.

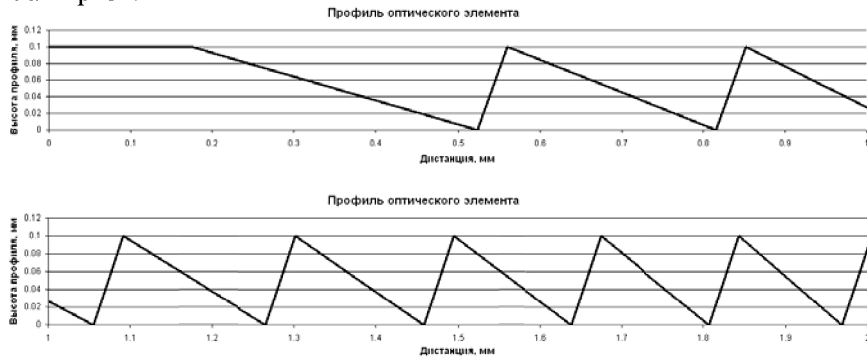


Рис. 45. Дискретизированный профиль оптического элемента

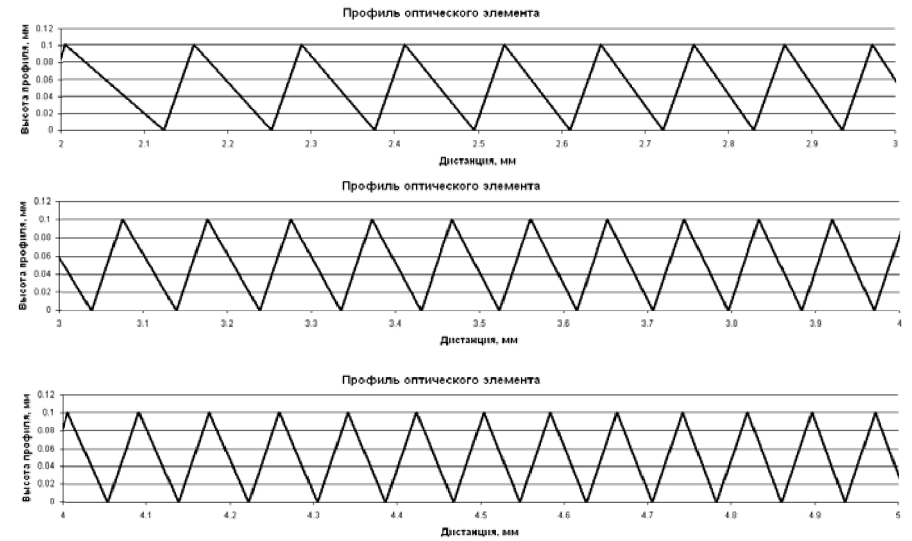


Рис. 45. Дискретизированный профиль оптического элемента (окончание)

Угловое распределение интенсивности света, прошедшего переднюю грань волновода, показано на рис. 46. ШНП распределения соответствует 39° ($\pm 19,5^\circ$). КПД ввода в волновод возрос до 84,4 %.

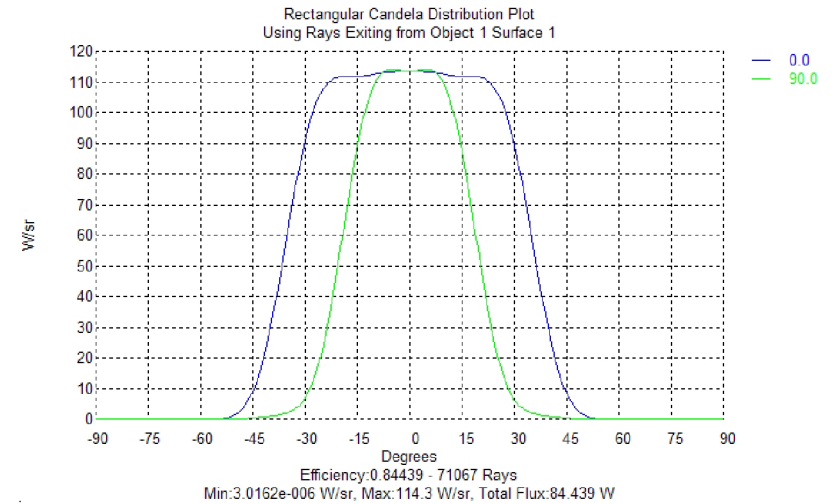


Рис. 46. Угловое распределение интенсивности

Распределение интенсивности на поверхности волновода показано на рис. 47. Распределение интенсивности на передней грани волновода на расстоянии 3,5 мм от светодиода показано на рис. 48. Распределение интенсивности на передней грани волновода на расстоянии 5 мм от светодиода показано на рис. 49.

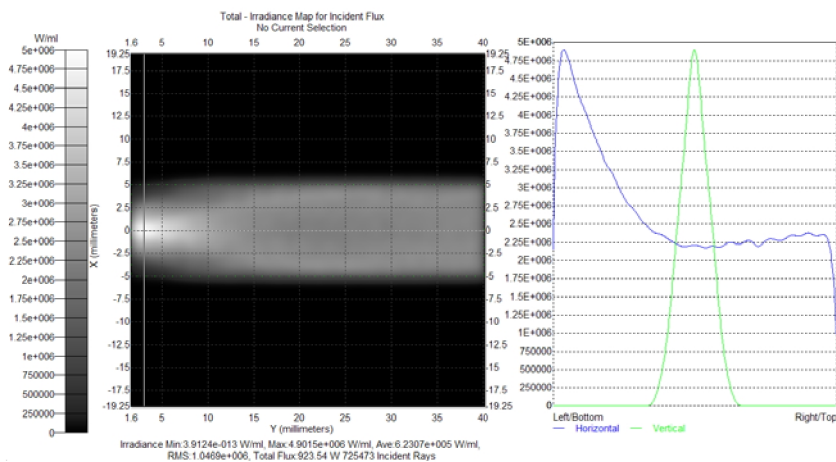


Рис. 47. Распределение интенсивности в волноводе

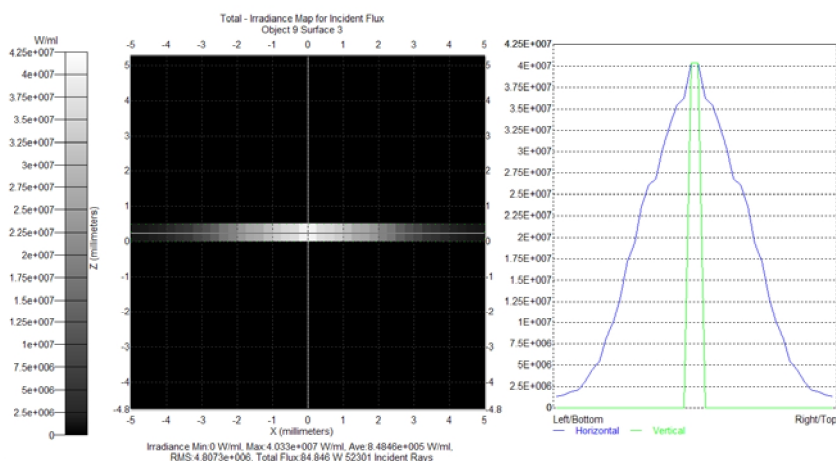


Рис. 48. Распределение интенсивности на передней грани волновода (на расстоянии 3,5 мм от светодиода)

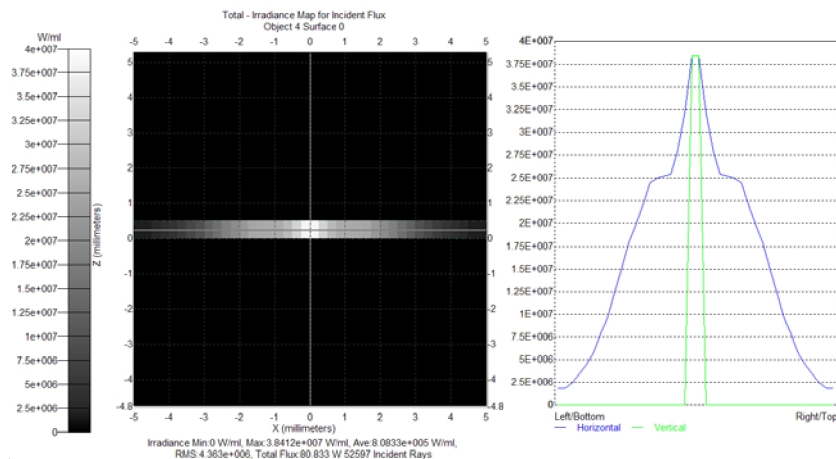


Рис. 49. Распределение интенсивности на передней грани волновода (5 мм от светодиода)

Равномерность распределения интенсивности в волноводе увеличивается до 85,1 %. Равномерность распределения интенсивности на передней грани волновода на расстоянии 3,5 мм от светодиода увеличивается до 30 %. Равномерность распределения интенсивности на передней поверхности волновода на расстоянии 5 мм от светодиодов увеличивается до 40 %.

Невысокая равномерность объясняется низкой эффективностью распределения интенсивности от центра коллиматора к его краям. В реальности, данная геометрия микроструктуры не позволяет распределять свет от центра к периферии, где будут наблюдаться темные области.

Расчёт рельефа микроструктуры коллиматора длиной 5 мм

Уменьшение ШНП и увеличение равномерности света в волноводе возможно путём увеличения длины коллиматора. Непрерывный микрорельеф, рассчитанный аналогичным образом для длины коллиматора, равной 5 мм, дискретизировался отрезками с шагом 0,1 мм. Рассчитанная форма поверхности рельефа высотой 0,1 мм показана на рис. 50.

Угловое распределение интенсивности света в волноводе при использовании удлиненного коллиматора показано на рис. 51. ШНП распределения равна $23,8^\circ$ ($\pm 11,9^\circ$). Эффективность ввода в волновод уменьшилась до 69,2 %.

Распределение интенсивности на поверхности волновода показано на рис. 52. Распределение интенсивности на передней грани волновода на расстоянии 5 мм от светодиода показано на рис. 53.

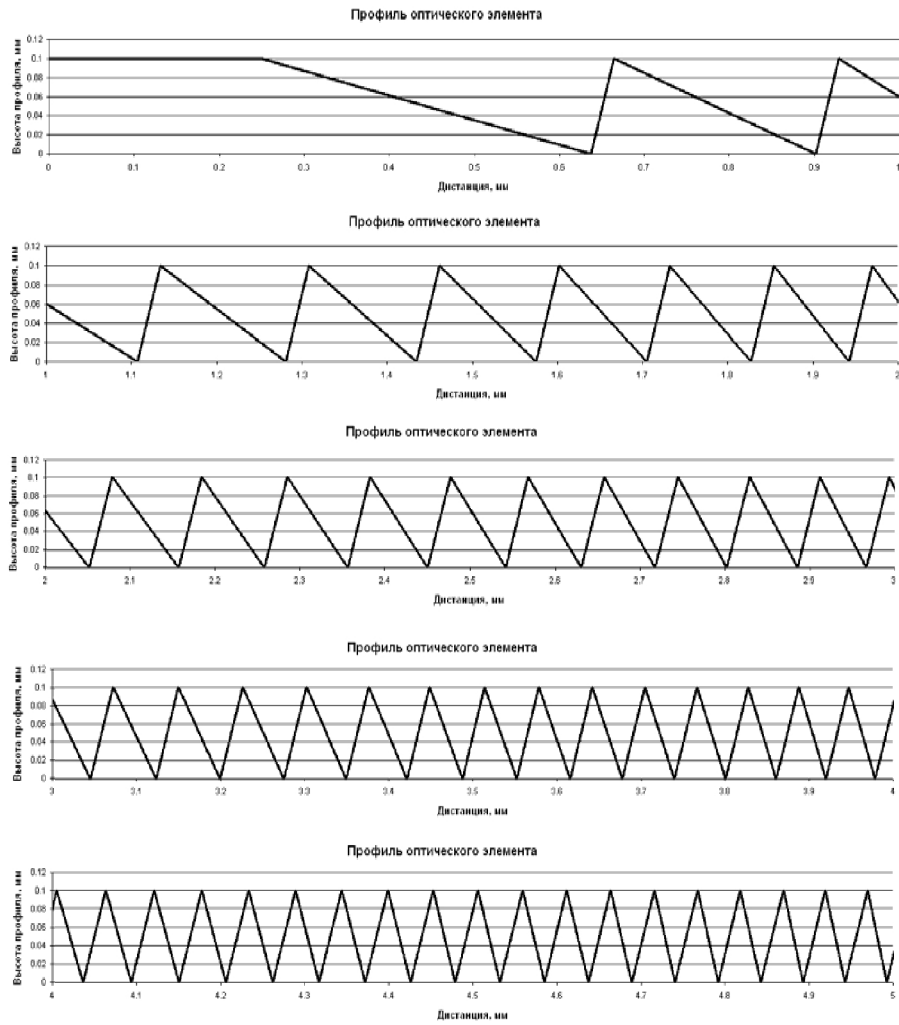


Рис. 50. Дискретизированный профиль микроструктуры удлинённого коллиматора

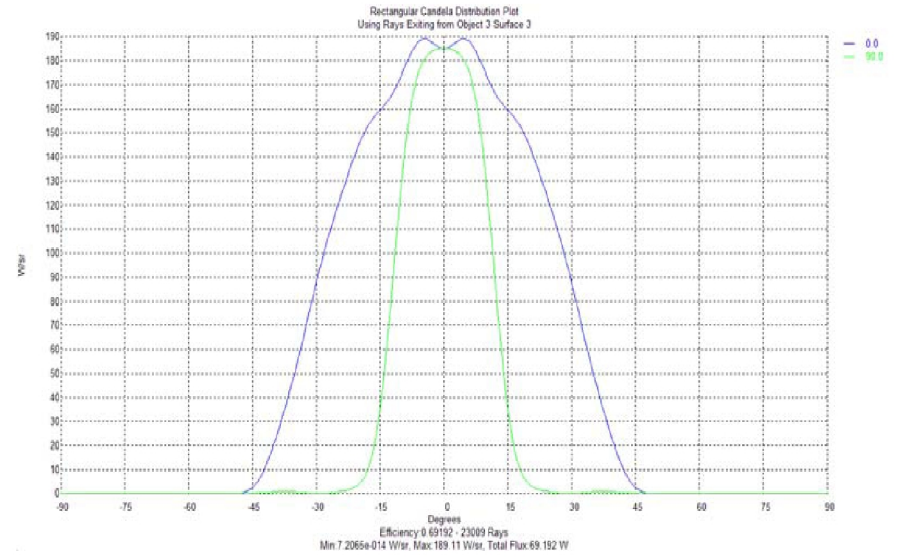


Рис. 51. Угловое распределение интенсивности

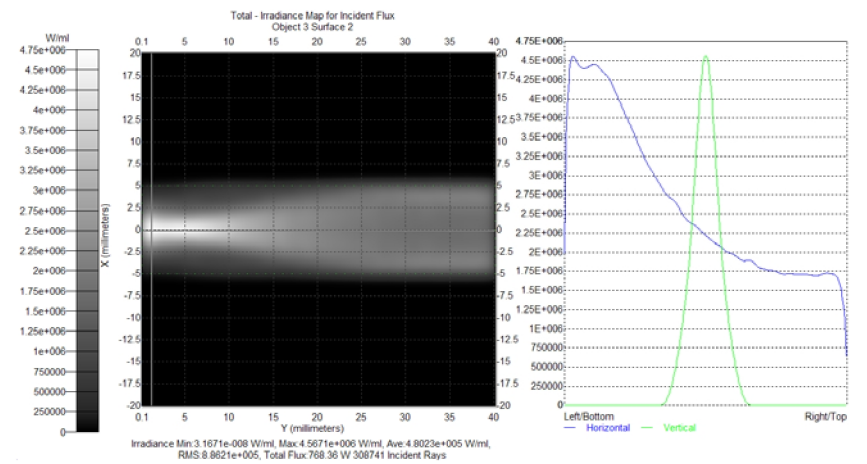


Рис. 52. Распределение интенсивности в волноводе

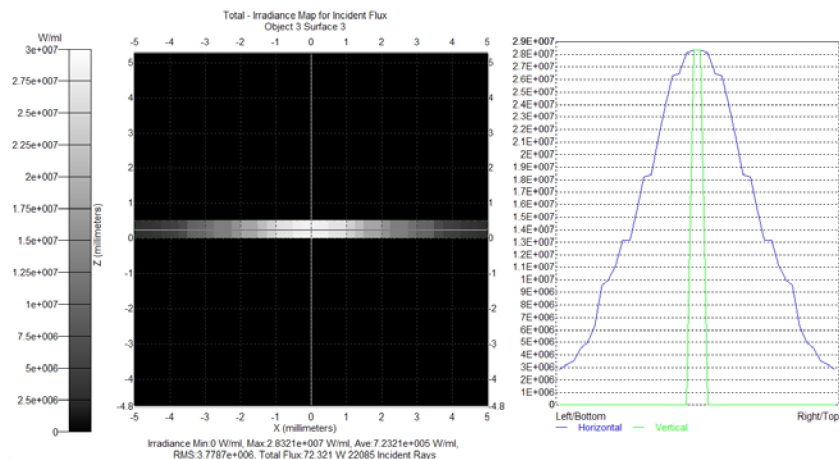


Рис. 53. Распределение интенсивности на передней грани волновода (на расстоянии 5 мм от светодиода)

Равномерность распределения интенсивности в волноводе уменьшилась до 72,2 %. Равномерность распределения интенсивности на передней грани волновода на расстоянии 5 мм от светодиода увеличилась до 46 %.

Равномерность в волноводе невелика из-за узкого углового распределения падающего света, приводящего к низкому уровню распределения интенсивности от центра коллиматора к его краям. ПВО лучей на краях микроструктуры коллиматора приводит к низкому КПД ввода и низкой равномерности. На следующем шаге коллиматор длиной $d = 5$ мм будет оптимизирован для уменьшения доли света испытывающего ПВО и увеличения доли, проходящей в волновод.

Оптимизация КПД ввода

Профиль рельефа для коллиматора длиной 5 мм модифицировался с целью увеличения ШНП углового распределения интенсивности. Это позволило увеличить долю света с большими углами отклонения от плоскости xy , проходящего через микроструктуру. Оптимизированный непрерывный микрорельеф дискретизировался с шагом 0,1 мм отрезками. Рассчитанная форма поверхности рельефа высотой 0,1 мм показана на рис. 54.

Угловое распределение интенсивности света, прошедшего через переднюю грань волновода, показано на рис. 55. ШНП распределения интенсивности равна 28° ($\pm 14^\circ$). Эффективность ввода в волновод увеличилась до 75,1 %.

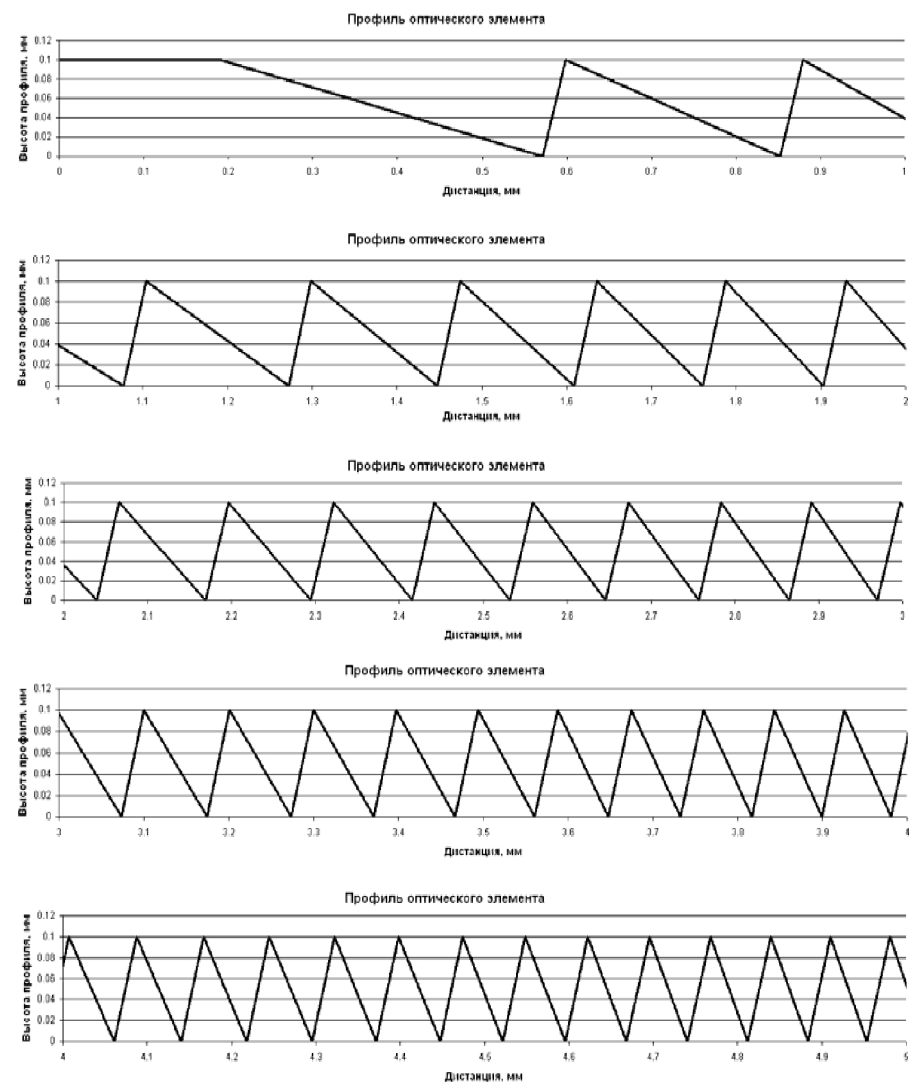


Рис. 54. Дискретизированный профиль оптического элемента

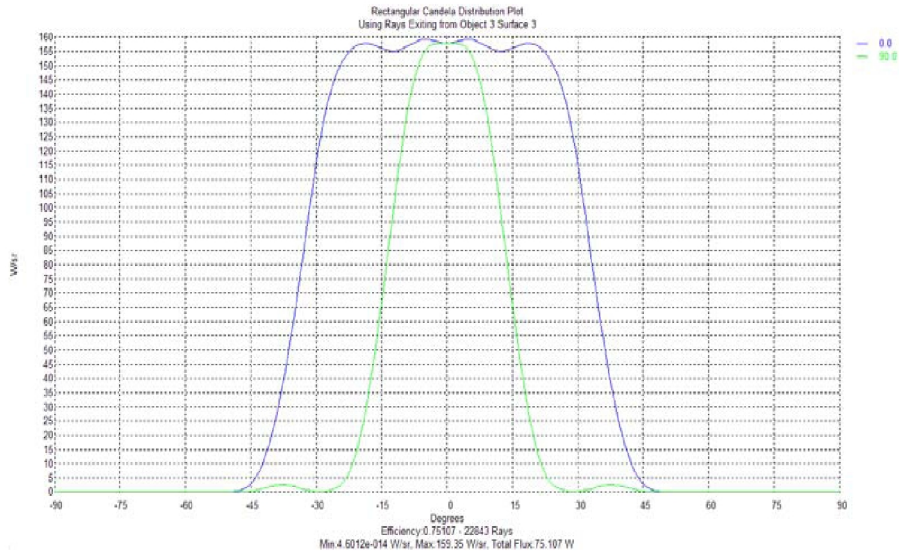


Рис. 55. Угловое распределение интенсивности

Распределение интенсивности на поверхности волновода показано на рис. 56. Распределение интенсивности на передней грани волновода на расстоянии 5 мм от светодиода показано на рис. 57.

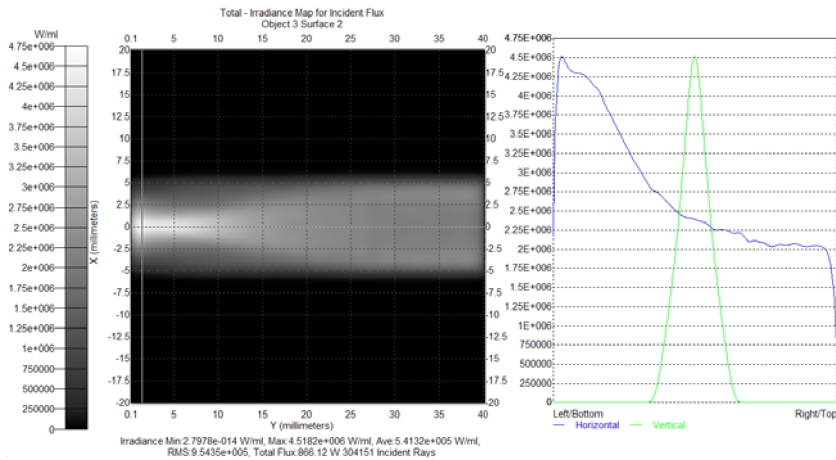


Рис. 56. Распределение интенсивности в волноводе

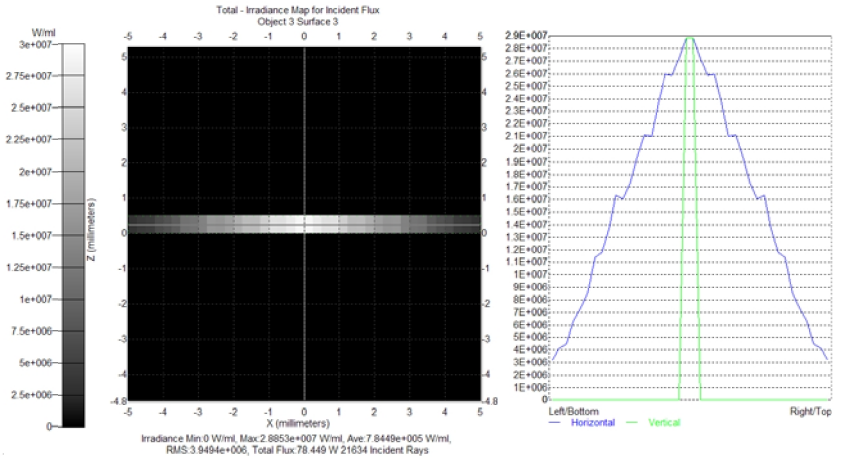


Рис. 57. Распределение интенсивности на передней грани волновода (на расстоянии 5 мм от светодиода)

Равномерность распределения интенсивности в волноводе увеличилась до 80,4 %. Равномерность распределения интенсивности на передней стороне волновода на расстоянии 5 мм от светодиода увеличилась до 55,2 %.

Обобщающая табл. 16 содержит информацию о ШНП, равномерности в волноводе U_w , равномерности на передней поверхности волновода U_f в 3,5 мм и 5 мм от светодиода, эффективности ввода E для каждого дизайна.

Таблица 16. Сводная таблица результатов численных экспериментов

	3,5 мм коллиматор	3,5 мм коллиматор (оптимизированный)	5 мм коллиматор	5 мм коллиматор (оптимизированный)
ШНП	29° (+/- 14,5°)	39° (+/- 19,5°)	23,8° (+/- 11,9°)	28° (+/- 14°)
U_w	76,5 %	85,1 %	72,2 %	80,4 %
U_f (3,5 мм)	26,0 %	30,0 %	-	-
U_f (5 мм)	28,9 %	40,0 %	46,0 %	55,2 %
E	75,9 %	84,4 %	69,2 %	75,1 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем пособии рассмотрены основные проблемы и подходы к проектированию и анализу оптических систем ввода излучения светодиодов.

В пособии описан современный пакет системы автоматизации проектирования оптических приборов TracePro, широко распространенный в практике проектирования и являющийся универсальным инструментом решения задач светотехники. Приведенные задачи проектирования систем ввода света в волновод применительно к существующим требованиям призваны помочь получить знания общей методологии проектирования оптических приборов.

Понятно, что учебное пособие ввиду ограниченности его объема не может охватить всех особенностей и подробностей проектирования оптических приборов. Например, методы решения задач оптимизации рассматриваются достаточно сжато, а также на описательном уровне рассматривается программная архитектура TracePro.

Продукты уровня TracePro идеальны для освоения основ оптики и светотехники в процессе изучения соответствующих дисциплин, а также отвечают запросам профессионального проектировщика.

СПИСОК СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

- Коллиматор
- Однородность распределения
- Светодиод
- Волновод
- TracePro
- Ширина углового распределения интенсивности на полувысоте
- Полное внутреннее отражение
- Преломление света

СПИСОК КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ

1. В чем преимущества использования светодиодов в системах подсветки?
2. В чем состоит задача оптимизации систем ввода света в волновод?
3. Опишите принцип работы с программой TracePro.
4. Напишите уравнения расчета однородности распределения интенсивности излучения по поверхности.
5. Опишите преимущества и недостатки использования дифракционного и рефракционного рельефов в светодиодных системах ввода света.
6. Напишите закон преломления света.
7. Как влияет увеличение длины коллиматора на ширину углового распределения интенсивности по полувысоте?
8. Что является результатом недостаточно большой однородности интенсивности света на входе в волновод?
9. Что является результатом недостаточно большой однородности углового распределения интенсивности света на входе в волновод?
10. В чем состоит необходимость проверки эффективности работы системы ввода излучения при сдвиге источника света?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kälantär, K.** Optical micro deflector based functional light-guide plate for backlight unit / K. Kälantär [and others] // Tech. digest SID'00. – 2000. – P. 1029-1031.
2. **Matsumoto, S.** Functional light-guide plate characterized by optical micro-structures for LCD backlight unit / S. Matsumoto [and others] // Proc. IDW'00. – 2000. – P. 463-466.
3. **Kälantär, K.** Functional light-guide plate structured by optical micro-reflector array for frontlighting of mobile phones and PDAs / K. Kälantär [and others] // Proc. IDW'01. – 2001. – P. 645-648.
4. Методы компьютерной оптики. – Изд. 2-е перераб. и доп. / под ред. В.А. Соифера. – М.: Физматлит, 2003. – 688 с.
5. **Волобой, А.Г.** Оптические элементы как средство расширения функциональности программ оптического моделирования / А.Г. Волобой [и др.] // Графикон-2006: сб. науч. тр. – Новосибирск, 2006. – С. 182-191.
6. **Алямовский, А.А.** SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 600 с.
7. **Nesterenko, D.V.** Design and analysis of tapered waveguides as collimators for LED backlighting / D.V. Nesterenko, J.H. Min, H.Y. Choi // Proc. SID '05. – Vol. 36. – Issue 1. – P. 1388-1391.
8. **Запрягаева, Л.А.** Расчет и проектирование оптических систем: учеб. для вузов по направлению “Опготехника” и спец. “Оптико-электронные приборы” / Л.А. Запрягаева, И. С. Свешникова. – М.: Логос, 2000. – 584 с.
9. **Cornelissen, H.J.** Polarized Light LCD Backlight Based on Liquid Crystalline Polymer Film: A New Manufacturing Process / Hugo J. Cornelissen [and others] // SID Digest. – 2004. – P. 1178-1181.
10. **US patent 6547423 B2.** LED collimation optics with improved performance and reduced size / Marshall T.
11. **US patent 4767172.** Collector for a LED array / Nichols V.R., Nubble F.F., Martin J.P.
12. Optical Design Tools for Backlight Displays [Электронный ресурс]. – [Http://www.opticalres.com/white_papers/ToolsforBacklights.pdf](http://www.opticalres.com/white_papers/ToolsforBacklights.pdf). – Optical Research Associates.
13. Lighttools product description [Электронный ресурс]. – [Http://www.opticalres.com/lt/ltprodds_f.html](http://www.opticalres.com/lt/ltprodds_f.html). – Optical Research Associates.
14. TracePro Overview [Электронный ресурс]. – [Http://www.lambdaresearch.com/products/tracepro/index.phtml](http://www.lambdaresearch.com/products/tracepro/index.phtml). – Lambda Research Corporation.

15. ASAP Optical Engineering Software, ReflectorCAD Reflector [Электронный ресурс]. – [Http://www.breault.com/software/software-overview.php](http://www.breault.com/software/software-overview.php). – Breault Research Organization.
16. SPEOS general overview [Электронный ресурс]. – [Http://www.optisworld.com/G_O.asp?soft_id=1](http://www.optisworld.com/G_O.asp?soft_id=1). – OPTIS.
17. **Шехонин, А.А.** Методология проектирования оптических приборов / А.А. Шехонин, В.М. Домненко, О.А. Гаврилина. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 91 с.
18. TracePro. User's manual. Release 3.0 [Электронный ресурс]. – USA: Lambda Research Corporation, 2003.
19. TracePro. User's manual supplement. Release 3.1 [Электронный ресурс]. – USA: Lambda Research Corporation, 2003.
20. TracePro. User's manual supplement. Release 3.2 [Электронный ресурс]. – USA: Lambda Research Corporation, 2003.

Учебное издание

**КОТЛЯР Виктор Викторович,
ХОНИНА Светлана Николаевна,
НЕСТЕРЕНКО Дмитрий Владимирович,
НАЛИМОВ Антон Геннадьевич.**

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СО СВЕТОДИОДАМИ

Учебное пособие

Редакторская обработка
Доверстка

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5.
Тираж экз. Заказ . ИП- /2007

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.