

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ имени М.В. Келдыша

А.Г.Волобой, В.А.Галактионов, Д.Д.Жданов

**Программное моделирование светопроводящих  
систем**

Москва, 2007

**А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Д.Д. Жданов**  
**Программное моделирование светопроводящих систем**

*Аннотация.* В производстве осветительных систем жидкокристаллических дисплеев, приборных панелей автомобилей и других оптических устройств применяются новейшие технологии и материалы. В работе представлена разработанная программная система оптического моделирования, которая поддерживает возможность сквозного расчета таких сложных светопроводящих приборов. Описаны механизмы описания и представления моделируемых оптических объектов, такие как процедурные представления и генераторы поверхностей и текстур специального вида. Вводится концепция оптических элементов, позволяющих моделировать распространение света в поверхностях с микрорельефом, материалах со свойствами пространственного рассеяния света, сложных поляризационных фильтрах. Описаны программные средства для анализа результатов оптического моделирования, позволяющие отображать информацию в числовой и графической форме.

**A. Voloboy, V. Galaktionov, D. Zhdanov**  
**Computer simulation of complex lighting systems**

**Abstract.** Modern industry of LCD displays and other similar optical devices uses advanced materials and technologies. This article presents developed software system which supports straight through simulation of such complex lighting devices. Procedures and tools to define simulated optical scenes are described, such as procedural representation and surface and texture generators. Concept of OPTOS (OPTical ObjectS) is introduced that extends optical simulation software with means for modeling of light propagation through materials with volume scattering properties, surfaces with micro-relief, complex polarization filters (DBEF). Mechanisms for analysis of simulation results (observers) that display information both in numerical and graphical form are also described.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований, гранты № 06-07-89162 и № 07-01-00450, а также фирмой INTEGRA (Япония).

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение .....	4
2 Средства отображения и анализа результатов моделирования.....	7
2.1 Элементы наблюдения .....	7
2.1.1 Анализ распределения освещенности и яркости на плоскости.....	8
2.1.2 Анализ углового распределения света в модели.....	10
2.1.3 Визуализация результатов .....	11
2.1.4 Контроль точности.....	13
2.2 Визуализация распространения света в модели.....	14
3 Механизмы описания и представления элементов оптической системы.....	16
3.1 Проблемы представления элементов оптической системы ..	16
3.2 Процедурные представления .....	17
3.2.1 Процедурные оптические текстуры .....	17
3.2.2 Процедурная геометрия .....	19
3.2.3 Пример оптического моделирования с применением процедурных представлений .....	22
3.3 Генераторы поверхностей и текстур специального вида .....	26
3.4 OPTOS - оптические элементы.....	28
4 Заключение .....	30
Литература.....	31

# 1 Введение

Растущие требования, предъявляемые к эргономичности и эффективности современной техники, заставляют производителей искать новые решения при проектировании жидкокристаллических (LCD) мониторов, приборных панелей автомобилей и других аналогичных устройств. Для того чтобы добиться максимально равномерного и комфортного освещения экрана монитора или приборной панели, создаются сложные системы подсветки, в производстве которых используются высокотехнологичные светопроводящие элементы и устройства со сложными оптическими свойствами. На рис. 1 показан пример конструкции системы подсветки жидкокристаллического монитора и элементы, из которых она состоит.

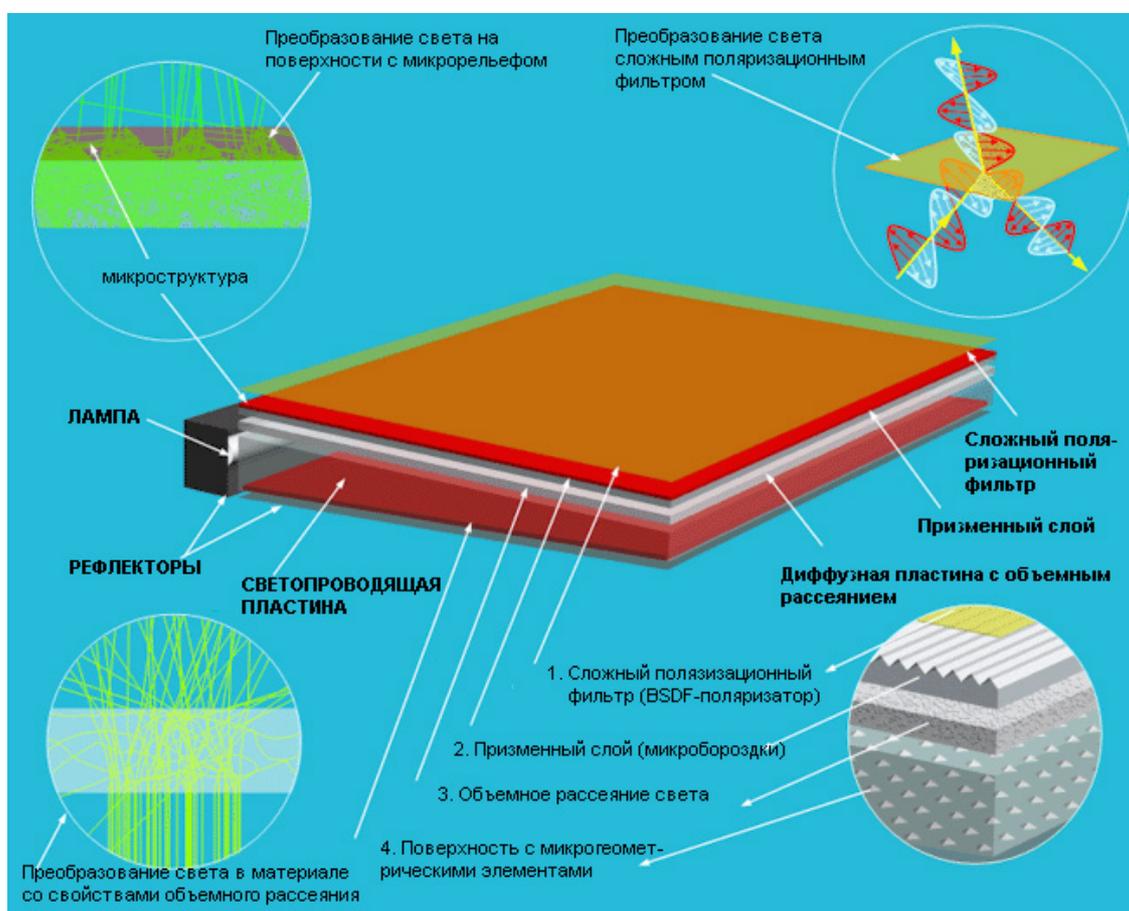


Рис. 1. Структура системы подсветки монитора и ее элементы

Свет, излучаемый лампой, отражается от рефлектора и поступает в светопроводящую пластину, которая содержит светорассеивающие микрочастицы или микроэлементы. Распространяясь внутри пластины, свет претерпевает многократное полное внутреннее отражение от ее поверхности. Рассеивание света на микрочастицах способствует выходу его из рабочей поверхности пластины.

Другие элементы устройства служат для усиления яркости и обеспечения ее равномерности на выходной поверхности.

Типичный процесс проектирования подобных устройств складывается из следующих составляющих:

- проектирование источников света (как правило, люминесцентные лампы или светодиоды) и рефлекторов для получения максимального светового потока на входе в светопроводящую пластину (СПП);
- проектирование структуры микрогеометрии на нижней, рассеивающей части СПП для получения пространственно равномерного распределения света над ее выходной (верхней) гранью, а также моделирование оптимальной формы СПП;
- проектирование одного или нескольких призматических слоев для концентрации и усиления светового потока на выходе жидкокристаллического экрана;
- проектирование диффузного и/или поляризационного фильтра (пленки) для еще большего усиления яркости экрана.

Этот процесс может варьироваться в зависимости от выбранной базовой конструкции устройства. Целью моделирования подобных систем является расчет пространственного и углового распределений яркости света над выходной гранью устройства. Задача заключается в том, чтобы усилить и сделать максимально равномерной яркость на выходной грани устройства.

В данной работе рассматриваются некоторые базовые функциональные возможности системы оптического моделирования SPECTER, разработанной для проектирования подобных устройств [1, 2]. Исторически SPECTER появился как развитие системы компьютерной графики, предназначенной для создания реалистичных изображений на основе моделей зданий, интерьеров и других архитектурных объектов [2]. В этой системе применяется алгоритм физически аккуратного моделирования распространения света путем прямой трассировки лучей по методу Монте Карло [1, 3], который статистически воспроизводит реальный физический процесс распространения света в сцене. Он позволяет с высокой точностью учитывать широкий спектр оптических явлений, допускает эффективную реализацию, в том числе с использованием параллельных и распределенных вычислений. Созданная технология расчета распространения света оказалась столь эффективной и точной, что позволила сделать следующий шаг и перейти к моделированию сложных оптических светопроводящих и осветительных систем.

Однако для создания системы моделирования сложных оптических устройств потребовалось решить еще целый ряд специфических для этой области проблем. Ниже перечислены наиболее существенные из них.

- *Расширение круга поддерживаемых оптических явлений*, включая сложные светорассеивающие свойства поверхностей и поляризацию света.
- *Эффективное моделирование объектов и материалов со сложными оптическими свойствами*, такими как поверхности с микрорельефом,

материалы с микрочастицами, создающими эффект объектного рассеяния света, и др. (см. рис. 1). Поверхности пластин, которые используются в системах подсветки современных LCD-мониторов, могут содержать десятки и сотни миллионов микрогеометрических элементов. Очевидно, подобные сложные микроструктуры не могут быть заданы традиционными геометрическими способами, например, в виде множеств многоугольников или в виде сплайнов (NURBS), поскольку размер такого описания превысил бы объем памяти современных ЭВМ. Кроме того, традиционные способы задания геометрии не обеспечивают достаточно эффективной реализации трассировки лучей. Поэтому для представления подобных компонентов светопроводящей системы необходимы новые методы.

- *Возможность в интерактивном режиме изменять геометрию элементов модели*, в том числе, микрогеометрию поверхностей. В процессе проектирования приходится многократно изменять параметры различных элементов модели, до тех пор, пока не будет найден оптимальный с точки зрения заданных критериев вариант, поэтому система должна поддерживать возможность изменять компоненты устройства в соответствии с заданными разработчиком параметрами.
- *Развитые средства для анализа результатов моделирования*. Проектировщика могут интересовать различные виды распределения световой энергии в модели, например, пространственное распределение света над выходной поверхностью устройства, а также угловое распределение излучаемого устройством света. Соответственно, система оптического проектирования должна обеспечивать вычисление подобных распределений с необходимой точностью.

Таким образом, создание системы проектирования сложных оптических устройств потребовало доработки программных средств трассировки лучей, реализации новых механизмов для представления элементов со сложными оптическими свойствами и средств анализа результатов.

Исторически одними из первых инструментов, реализованных в системе SPECTER, были так называемые элементы наблюдения, предназначенные для представления и анализа результатов моделирования в числовой и графической форме. Элементам наблюдения и другим средствам отображения результатов моделирования посвящена гл. 2. В гл. 3 рассмотрены различные методы описания и представления элементов оптических систем, реализованных в SPECTER, – процедурные средства, генераторы элементов специальных видов, а также оптические элементы, являющиеся эффективным и универсальным средством для моделирования оптически сложных поверхностей и материалов. В гл. **Error! Reference source not found.** представлены возможности моделирования и анализа состояния поляризации света.

## 2 Средства отображения и анализа результатов моделирования

Основным инструментом для анализа результатов моделирования в системе SPECTER являются так называемые *элементы наблюдения*, позволяющие регистрировать и отображать различные виды распределения световой энергии в модели. При помощи элементов наблюдения проектировщик может оценивать, насколько данная модель устройства соответствует критериям проектирования.

Другой механизм отображения и анализа результатов моделирования, поддерживаемый SPECTER, - визуализация распространения света в модели в виде траекторий множества лучей. Визуализация лучей, с одной стороны, позволяет выявить и исправить ошибки, которые могли быть допущены в описании модели устройства, а с другой – подсказать проектировщику источник несоответствия модели критериям проектирования.

### 2.1 Элементы наблюдения

В системе визуализации архитектурных проектов, на основе которой создавался SPECTER, результаты моделирования накапливались в виде так называемых карт освещенности, для которых поддерживалась визуализация тоновой заливкой. Это средство является удобным инструментом анализа для приложений в области архитектуры, дизайна интерьеров, светотехнического оформления. Однако для приложений оптического проектирования необходимы более развитые и точные средства анализа, позволяющие эффективно проверять соответствие модели критериям проектирования.

Обычно основным критерием при проектировании систем подсветки является равномерность яркости на выходной поверхности устройства. Существенно также угловое распределение интенсивности излучаемого устройством света, поскольку прибор обычно обзревается под определенным углом. Для анализа соответствующих распределений в SPECTER реализованы инструменты, называемые *элементами наблюдения*. Элемент наблюдения представляет собой виртуальный светочувствительный сенсор, который, не оказывая влияния на распространение света в модели, регистрирует лучи в процессе их трассировки и накапливает распределение световой энергии в соответствии с заданными пользователем параметрами. В сцене может быть задано одновременно несколько элементов наблюдения. Далее в этом разделе будут рассмотрены элементы наблюдения, позволяющие анализировать распределения яркости и освещенности на заданной плоскости, а также угловое распределение интенсивности.

Элементы наблюдения также включают средства для анализа состояния поляризации регистрируемого света, которые рассматриваются далее в гл. **Error! Reference source not found.**

### 2.1.1 Анализ распределения освещенности и яркости на плоскости

Для анализа распределения яркости или освещенности на некоторой плоскости в SPECTER служат плоские элементы наблюдения. Эти элементы могут в общем случае иметь форму параллелограмма, хотя на практике обычно используются элементы прямоугольной формы. Пользователь задает положение элемента в сцене и разрешение по двум измерениям. В соответствии с заданным разрешением элемент наблюдения разбивается на ячейки одинакового размера, и в ходе трассировки лучи регистрируются в соответствующих ячейках. На рис. 2 показан элемент наблюдения для анализа распределения яркости над выходной гранью устройства подсветки.

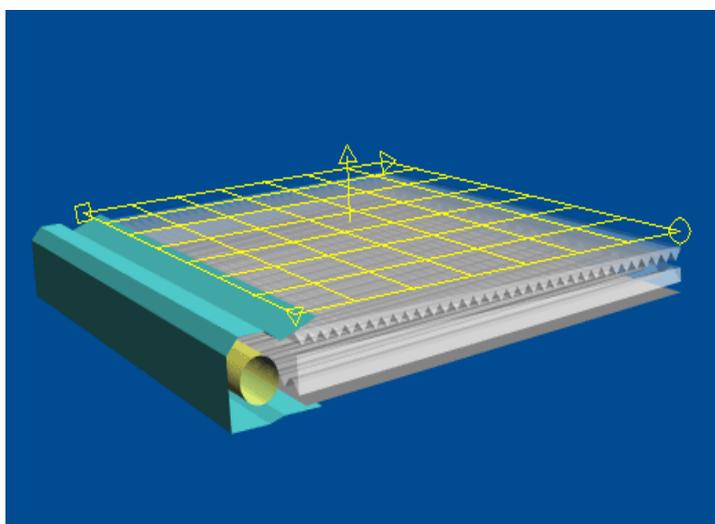


Рис. 2. Элемент наблюдения для анализа распределения яркости, расположенный над выходной гранью устройства подсветки

Обычно человек, использующий устройство («конечный пользователь» проектируемого устройства) обзорекает его под некоторым углом зрения. Поэтому важно, чтобы определенные параметры яркости (уровень, равномерность) соблюдались для некоторого диапазона углов наблюдения. SPECTER поддерживает выборочную регистрацию лучей, которые поступают или исходят в заданном диапазоне направлений (рис. 3). Разработчик задает базовое направление и угловой диапазон относительно этого направления. Таким образом, элемент наблюдения измеряет среднюю яркость или освещенность для каждой ячейки в пределах заданного углового диапазона (угловой апертуры).

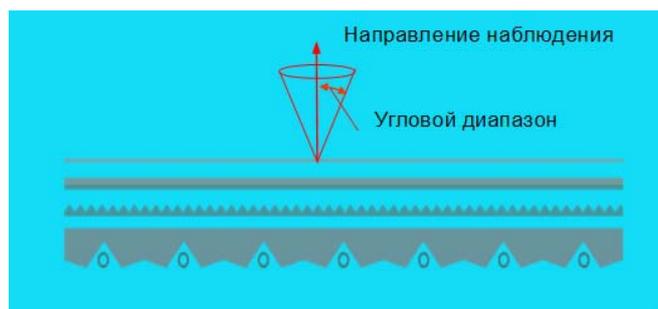


Рис. 3. Регистрация лучей в заданном угловом диапазоне

Элемент наблюдения для анализа распределения яркости можно сравнить с прибором, при помощи которого проводятся измерения яркости на поверхности (рис. 4). Основные параметры этого прибора – площадь фрагмента поверхности, на котором измеряется яркость, и угловая апертура – соответствуют параметрам элемента наблюдения в системе СПЕКТЕР (разрешение и угловой диапазон).

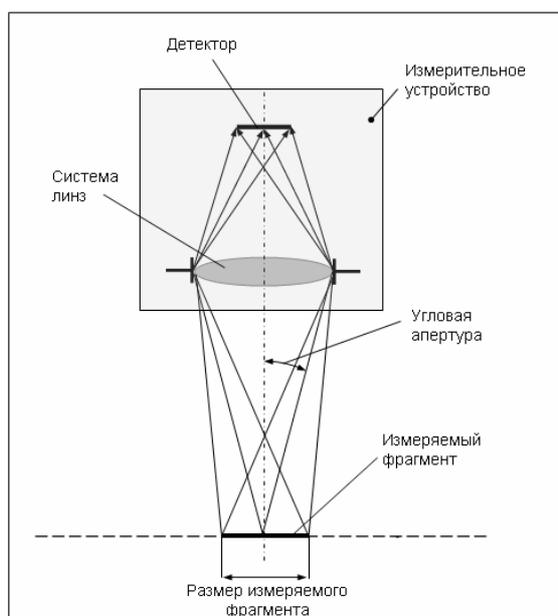


Рис. 4. Схема прибора для измерения яркости и параметры элемента наблюдения (плоскость измерения; размер области измерения; угловая апертура, область измерения; детектор; система линз)

Элемент наблюдения может быть свободным или прикрепленным к заданным поверхностям сцены. В первом случае регистрируются все лучи, достигающие поверхности элемента. Во втором случае регистрируются только лучи, достигшие поверхности, с которой связан элемент наблюдения, при этом берутся ортогональные проекции точек пересечения лучей с поверхностью на

элемент наблюдения. Рис. 5 иллюстрирует различия между двумя типами элементов наблюдения.

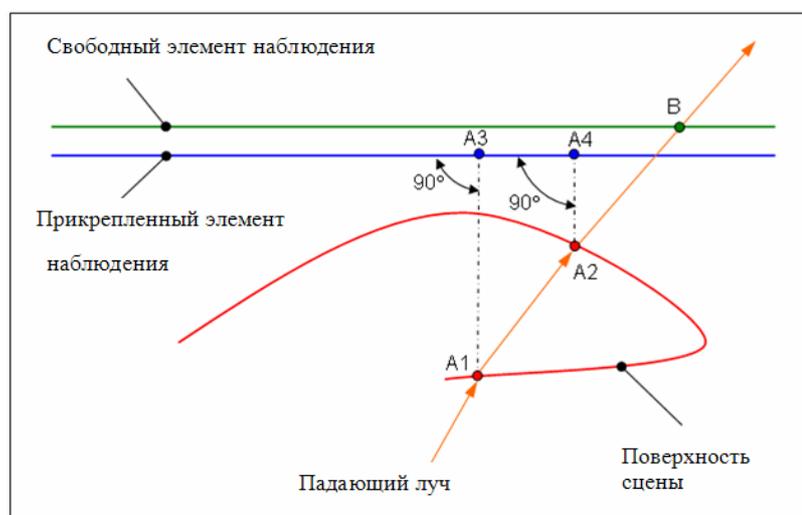


Рис. 5. Свободный элемент наблюдения и элемент, прикрепленный к поверхности сцены

Различия между свободным и прикрепленным элементом существенны, если поверхность, для которой определяется распределение яркости или освещенности, криволинейна, имеет непрямоугольную форму либо расположена не параллельно элементу наблюдения.

### 2.1.2 Анализ углового распределения света в модели

Элементы наблюдения для сбора информации об угловом распределении интенсивности света в модели удобно представлять в виде геосферы (рис. 6). Данные об интенсивности света накапливаются в ячейках, соответствующих различным диапазонам по широте ( $\theta$ ) и долготе ( $\varphi$ ). При этом важно только направление лучей, но не их положение.

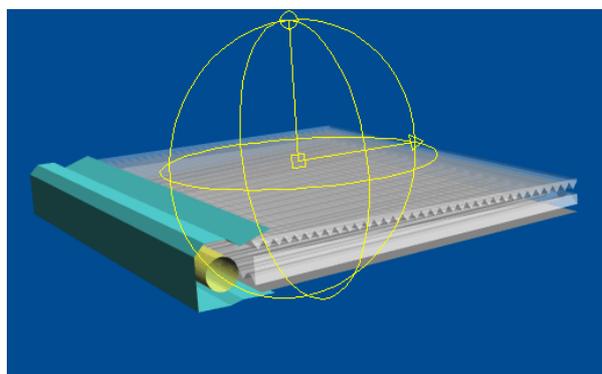


Рис. 6. Элемент наблюдения для сбора информации об угловом распределении интенсивности света в модели

Рис. 7 иллюстрирует параметры элемента наблюдения данного типа – разрешение по каждой из угловых координат ( $\theta, \varphi$ ), а также диапазон углов  $\theta$ , для которых будут накапливаться данные. Диапазон задается относительно направления, соответствующего  $\theta=0$ .

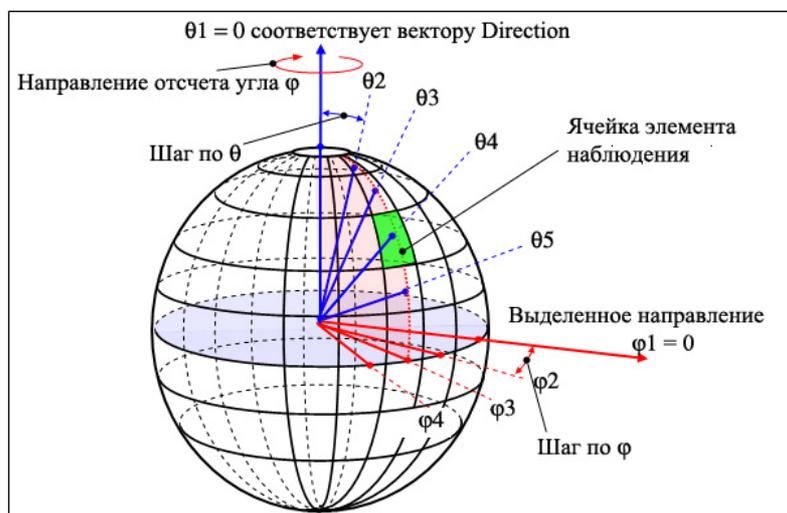


Рис. 7. Параметры элемента наблюдения для сбора информации об угловом распределении интенсивности света

Элементы наблюдения этого типа также могут быть свободными или привязанными к каким-либо объектам сцены. Свободный элемент наблюдения собирает свет, излучаемый всей моделью как целым, когда лучи покидают область сцены. Результаты, полученные при помощи такого элемента наблюдения, подобны результатам измерений гониодиаграммы света, излучаемого некоторым осветительным прибором, рассматриваемым как целое и обозреваемого с достаточно большого (бесконечного) расстояния.

Аналогичный результат можно получить, если ввести в сцену, например, куб, ограничивающий модель устройства и имеющий нейтральные оптические свойства (абсолютно прозрачный), и привязать к нему элемент наблюдения. В общем случае привязка элемента наблюдения к объектам сцены позволяет получить угловое распределение света, излучаемого некоторой частью модели.

### 2.1.3 Визуализация результатов

SPECTER поддерживает различные графические формы отображения результатов, полученных при помощи элементов наблюдения. Для распределений яркости или освещенности поддерживаются отображения в виде диаграммы яркости, графиков (для сечений по любому из двух направлений), изолиний с тоновой заливкой (рис. 8).

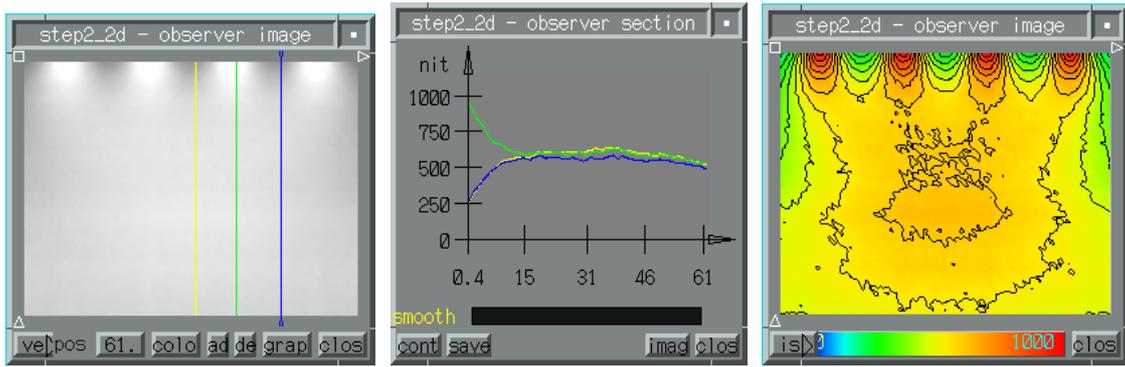


Рис. 8. Формы представления для распределений яркости и освещенности

Для угловых распределений интенсивности, помимо упомянутых форм, поддерживается представление в виде графиков в полярной системе координат (рис. 9).

Результаты также доступны в виде числовых таблиц, которые могут быть использованы для анализа при помощи внешних систем (электронные таблицы и т.п.)

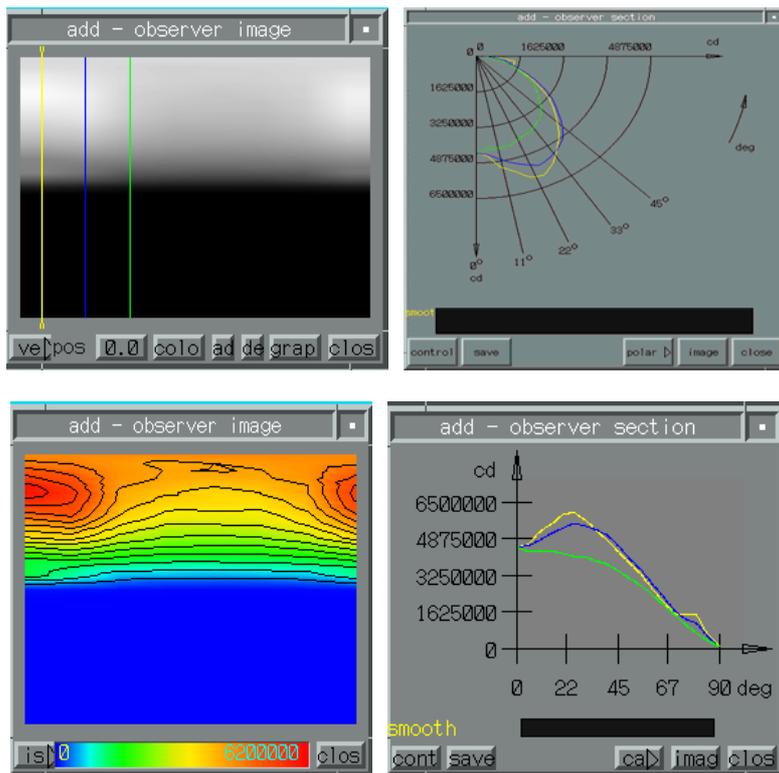


Рис. 9. Формы представления для углового распределения интенсивности

## 2.1.4 Контроль точности

Для карт освещенности контроль точности возможен лишь в виде оценки некоторой средней по все модели погрешности. Для оптического моделирования, очевидно необходимы более строгие механизмы контроля точности. В системе SPECTER для элементов наблюдения контроль точности поддерживается как по среднему значению погрешности, так и по минимальному и максимальному уровням. Поддерживаются визуальные формы представления информации о распределении погрешности по ячейкам элементов наблюдения. На рис. 10 показана карта распределения погрешности для некоторого элемента наблюдения; для выделенного пользователем фрагмента карты приведена гистограмма, а также статистика распределения погрешности.

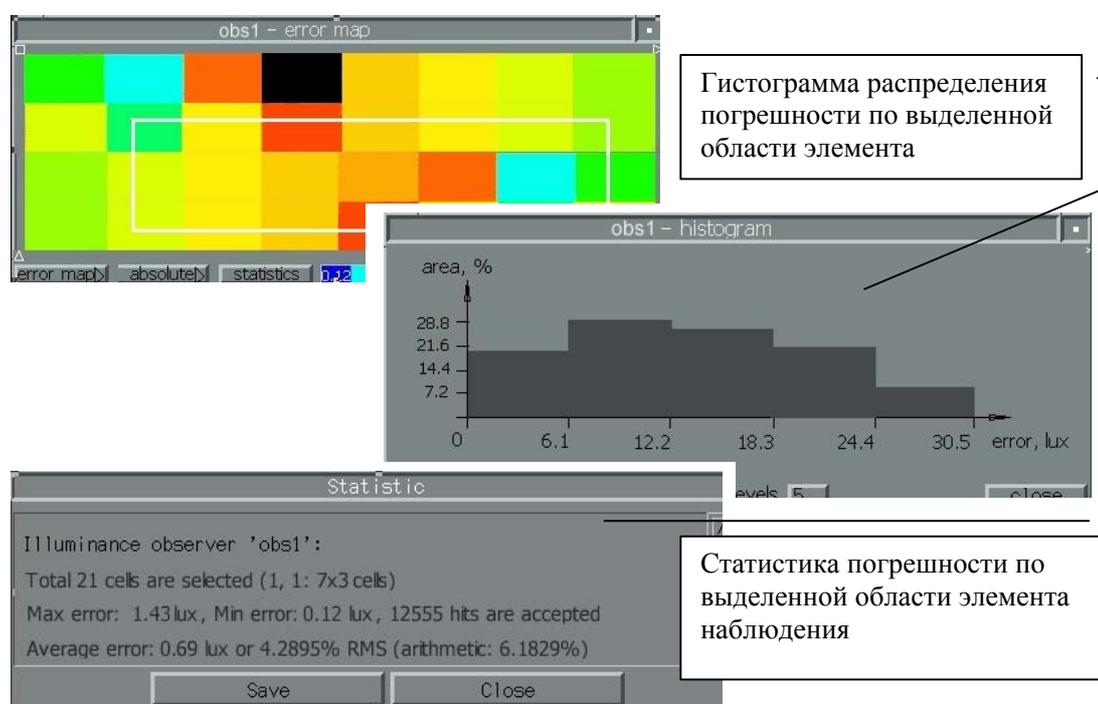


Рис. 10. Карта погрешности вычислений на заданном элементе наблюдения; гистограмма и статистика погрешности для выделенной области элемента наблюдения

Погрешность отслеживается и отображается в ходе трассировки лучей по методу Монте Карло. Пользователь может видеть, сколько времени прошло от начала вычислений и прогнозируемое время, необходимое для достижения заданной точности, а также данные элементов наблюдения, которые динамически обновляются в ходе вычислений (рис. 11).

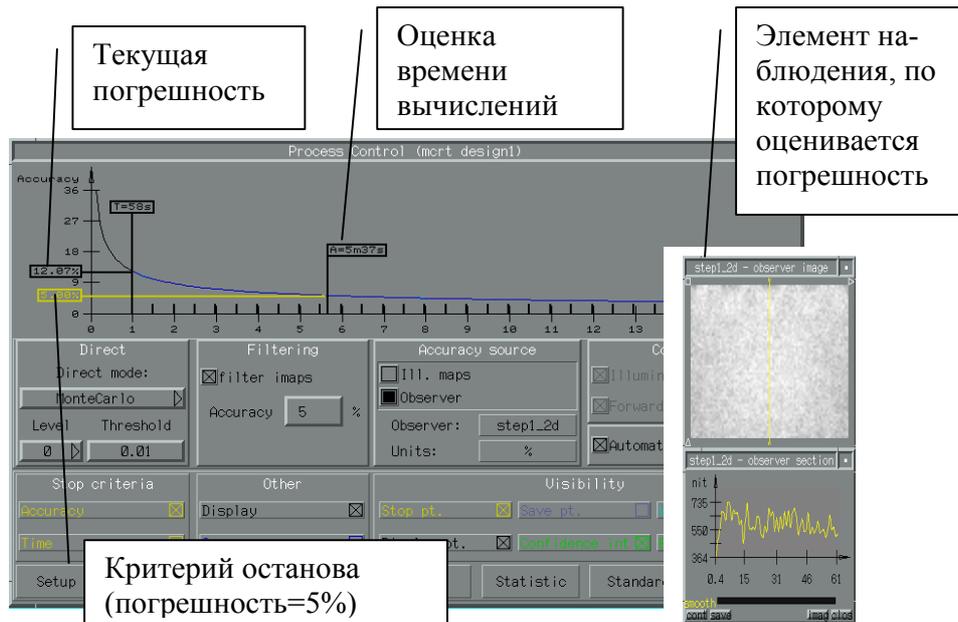


Рис. 11. Контроль погрешности в ходе трассировки лучей

## 2.2 Визуализация распространения света в модели

Другой механизм анализа результатов моделирования, поддерживаемый SPECTER, — визуализация распространения света в модели в виде траекторий множества лучей, которые отображаются в ходе трассировки лучей (рис. 12).

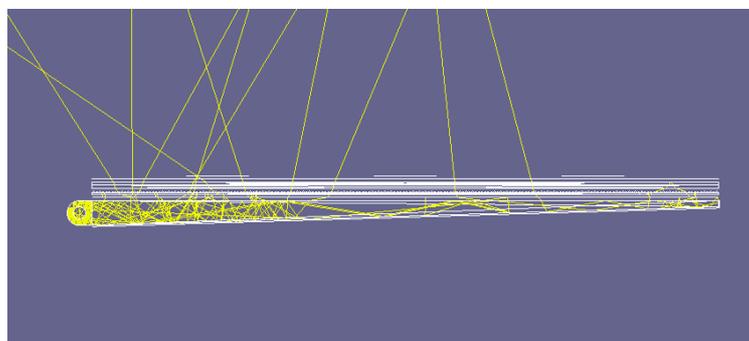


Рис. 12. Визуализация распространения света в модели

Для выборочной визуализации распространения света в модели, пользователь может задать критерии отображения. Примеры простых критериев:

- лучи, проходящие (не проходящие) через указанную поверхность;
- лучи, зарегистрированные (не зарегистрированные) указанным элементом наблюдения;

- лучи, претерпевшие определенный тип оптического преобразования (зеркальное отражение, преломление, диффузное отражение или пропускание, поглощение, полное внутреннее отражение и т.д.);
- лучи, «забракованные» в ходе трассировки, т.е. лучи, которые признаны некорректными в контексте данной модели.



Рис. 13. Пример визуализации некорректных лучей

Принцип отбраковки лучей основан на отслеживании среды, в которой распространяется луч на каждом отрезке своей траектории. При этом для каждой поверхности сцены известно, какие две среды находятся по обе ее стороны. Пусть некоторый луч, распространяющийся в данный момент в среде  $m_1$ , достиг поверхности  $S$ , которая разделяет собой среды  $m_2$  и  $m_3$ . Если  $m_1 \neq m_2$  и  $m_1 \neq m_3$ , то данный луч отбраковывается. Подобные некорректные ситуации могут возникать из-за дефектов и погрешностей в представлении геометрии сцены или из-за неверного задания оптических свойств элементов сцены. Инструмент визуализации показывает статистику таких лучей, из которой разработчик может заключить, насколько критичны имеющиеся дефекты. В примере на рис. 13 в окне статистики показано, что дефектных лучей обнаружено 4 из 29726 (примерно 0.01%).

На основе простых критериев при помощи связок И, ИЛИ, НЕ пользователь может создавать более сложные критерии, например:

- лучи, достигающие поверхностей  $A$  и  $B$ .
- лучи, исходящие из заданного источника света и не зарегистрированные заданным элементом наблюдения.

Инструмент визуализации лучей, в отличие от элементов наблюдения, ориентирован, в основном, на качественный анализ модели (при этом выдача статистики позволяет также получить и количественную информацию о распространении света). Визуализация лучей, с одной стороны, позволяет выявить и исправить ошибки, которые могли быть допущены в описании модели устройства, а с другой – подсказать проектировщику, как следует изменить модель устройства, чтобы приблизиться к желаемому результату.

На рис. 14-15 показаны примеры практического применения разработанного механизма визуализации лучей. Рис. 14 иллюстрирует визуализацию траекторий

лучей при расчете методом трассировки лучей системы светодиодов типа RGGB, помещенных в среду с объемным рассеянием. На рис.15 показаны траектории лучей, полученные в процессе проектирования плоского светодиода.



Рис. 14. Визуализация траекторий лучей в кластере светодиодов, помещенных в среду с объемным рассеянием

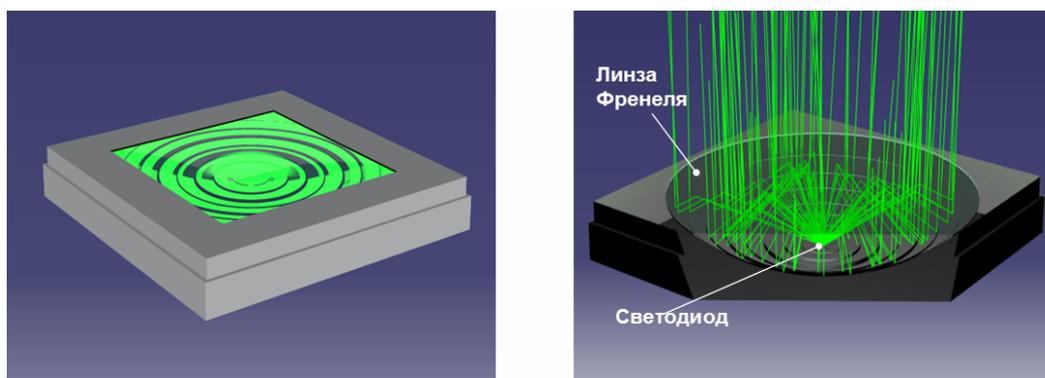


Рис. 15. Траектории лучей, полученные в процессе проектирования плоского светодиода

### 3 Механизмы описания и представления элементов оптической системы

#### 3.1 Проблемы представления элементов оптической системы

Традиционные САПР, при помощи которых обычно создаются сцены для оптического моделирования, такие как Catia, Pro Engineer, Unigraphics, SolidWorks и др., во многих случаях не удовлетворяют потребностям определения и представления оптически сложных элементов, являющихся ключевыми компонентами систем подсветки. Даже если САПР имеет средства для определения подобных объектов, результирующее представление либо недостаточно детально, либо не допускает эффективного и точного оптического моделирования. Проблемы могут быть связаны либо с эффектами волновой природы света, которые необходимо учитывать при моделировании, либо с необходимостью поддерживать представление сложнейшей микрогеометрии,

включающей миллионы или миллиарды геометрически сложных элементов (выпуклостей, бороздок, ячеек). При этом должна обеспечиваться высокая эффективность представления сложных элементов как с точки зрения объема необходимой памяти, так и с точки зрения вычислений, требуемых для трассировки лучей, проходящих через данные элементы.

Способ определения элементов должен также обеспечивать гибкие возможности модификации, поскольку в ходе проектирования оптической системы обычно приходится проводить моделирование множества ее вариантов.

Поскольку общепринятые геометрические представления (в виде множеств многоугольников или в виде сплайнов) не удовлетворяют указанным требованиям, в SPECTER с самого начала предпринимались попытки расширить традиционную базу данных сцены [4] механизмами, ориентированными на потребности оптического моделирования. В данной главе рассматриваются три таких механизма, реализованных в системе – процедурные представления (разд. 3.2), встроенные модули для генерации элементов специального вида (разд. 3.3) и оптические элементы (разд. 3.4). Все указанные механизмы в SPECTER могут совмещаться с традиционными средствами создания сцен при помощи САПР.

### **3.2 Процедурные представления**

Первым шагом на пути к решению указанных выше проблем стала реализация в системе SPECTER процедурных оптических текстур и процедурной геометрии. Оба вида элементов задаются в процедурной (аналитической) форме с параметрами, посредством которых пользователь может интерактивно изменять форму геометрического объекта или «рисунок» текстуры.

#### **3.2.1 Процедурные оптические текстуры**

В оптических системах могут применяться элементы, оптические свойства которых различны в разных областях поверхности. Например, на одной из поверхностей светопроводящей пластины могут быть нанесены так называемые диффузные точки, располагающиеся обычно в виде решетки.

В SPECTER для моделирования подобных поверхностей были реализованы процедурные оптические текстуры, где каждой точке текстуры ставится в соответствие некоторое значение определенного оптического атрибута. На рис. 16 показана текстура для моделирования решетки диффузных точек. В изображении текстуры яркость соответствует коэффициенту диффузного отражения – белый цвет соответствует областям, где коэффициент диффузного отражения имеет максимальное значение (1.0); черный цвет показывает области, где диффузные свойства отсутствуют.

SPECTER позволяет задавать подобные текстуры аналитически в виде отображения из некоторой области двумерного пространства в некоторую область пространства вещественных чисел. Например, текстура, показанная на рис. 16,

задается как показано на листинге 1 (с некоторыми незначительными упрощениями).

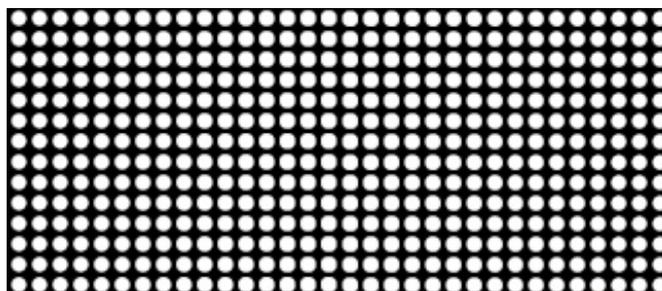


Рис. 16. Текстура для моделирования решетки диффузных точек

```
Parameters  
    fx diameter Function 0 100 ;; Диаметр точек (функция от  
координаты X)  
    s step 3.0 0.0001 9999999. ;; расстояние между центрами  
точек  
enddef  
RGBMresolution 500 500 ;; разрешение по x, y  
Region 0 100 -50 50 ;; диапазоны аргументов x и y  
  
x_c = (int(x/s) + 0.5) * s;  
y_c = (int(y/s) + 0.5) * s;  
R = fx(x_c, 10) * s / 200;  
R_circle = sqrt((x_c - x)^2 + (y_c - y)^2);  
mat = R_circle <= R;
```

Листинг 1. Определение процедурной текстуры, показанной на рис. 16.

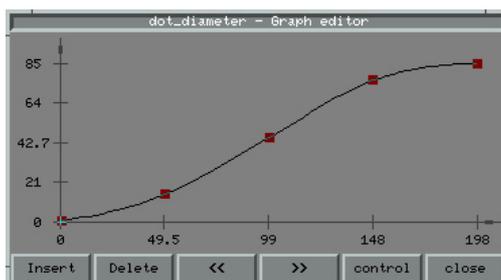
В листинге 1 в разделе **Parameters** описаны два параметра: *fx* – функциональный параметр, описывающий зависимость диаметра диффузного пятна от координаты *x* его центра, и *s* – шаг решетки, расстояние между центрами пятен. Идентификаторы **diameter** и **step** задают «внешние» имена параметров, которые будут отображаться в системе во время интерактивного редактирования параметров текстуры, см. разд. 3.2.3.

Запись **RGBMresolution** задает разрешение текстуры по осям  $X$  и  $Y$ . Чем выше разрешение, тем точнее представление текстуры и тем больше памяти потребуется для его хранения.

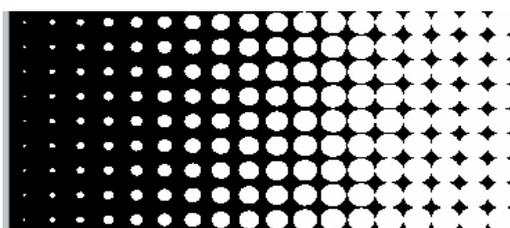
Запись **Region** задает границы области определения процедурной текстуры по осям  $X$  и  $Y$ .

Далее следует собственно процедурное определение текстуры. Значением текстуры в некоторой точке  $(x, y)$  из области, заданной в записи **Region**, является значение специальной переменной  $mat$  в этой точке. При этом  $mat$  обычно выражается через некоторые промежуточные переменные, которые могут иметь произвольные имена (не совпадающие с набором специальных имен). В данном примере промежуточные переменные имеют следующий смысл:

- переменные  $x_c$ ,  $y_c$  задают координаты центра диффузной точки, ближайшего к точке с координатами, равными значениям переменных  $x$ ,  $y$  ( $x$  и  $y$  – специальные переменные, пробегаящие значения в диапазоне **Region** с шагом, определяемым разрешением текстуры);
- переменная  $R$  определяет значение радиуса в зависимости от  $x$ -координаты центра ( $x_c$ );
- переменная  $R\_circle$  равна расстоянию от точки  $(x, y)$  до центра ближайшего пятна ( $x_c, y_c$ );
- наконец, переменная  $mat$  устанавливается равной 0 или 1 в зависимости от расстояния от точки  $(x, y)$  до точки  $(x_c, y_c)$ : если расстояние  $R\_circle$  меньше  $R$ , то  $mat=1$ , иначе  $mat=0$ . Здесь смысл операции  $<$  такой же, как в языке программирования C: ее результатом является 0 или 1 в зависимости от истинности отношения «меньше».



a)



b)

Рис. 17. Визуальное редактирование функционального параметра:

a) график функции, соответствующей параметру  $diameter$ , открытый в окне графического редактора; b) соответствующая текстура

Таким образом, данное определение отображает область двумерного пространства ( $0 < x < 100$ ,  $-50 < y < 50$ ) в область ( $0 \leq mat \leq 1$ ). По заданному описанию процедурной текстуры и значениям параметров SPECTER генерирует текстуру в

виде матрицы значений *mat* с заданным разрешением. С величиной *mat* в системе может быть сопоставлен любой атрибут, описывающий оптические свойства поверхности. В данном примере значением *mat* определяется коэффициент диффузного отражения поверхности, на которую накладывается данная текстура.

SPECTER поддерживает интерактивное визуальное редактирование функциональных параметров. На рис. 17 показан пример редактирования функционального параметра, задающего зависимость диаметра диффузных точек от координаты *X*.

В разд. 3.2.3 приведен пример применения рассмотренной текстуры в моделировании оптической системы подсветки.

### 3.2.2 Процедурная геометрия

Механизм процедурной геометрии основан на той же идее, что и механизм процедурных текстур. Процедурное определение геометрической формы в SPECTER – это отображение некоторой области двумерного пространства в трехмерное пространство.

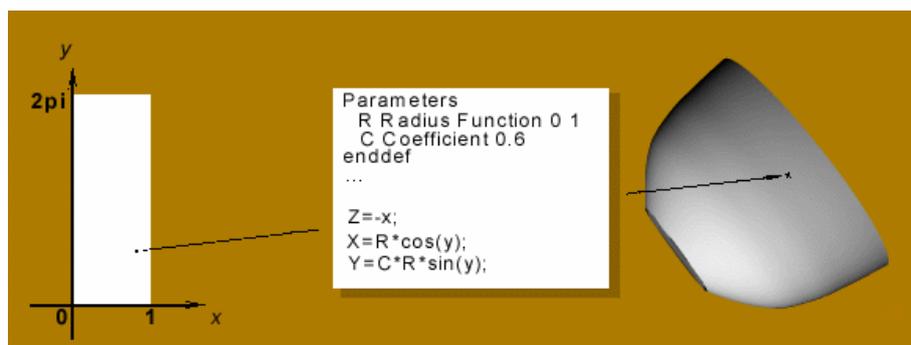


Рис. 18. Пример определения поверхности вращения средствами процедурной геометрии

На рис. **Error! Reference source not found.** показан пример определения поверхности вращения средствами процедурной геометрии. Параметр *R* (Radius) задает профиль поверхности в сечении плоскостью *XOZ*; параметр *C* задает коэффициент масштабирования по оси *Y* (при  $C \neq 1$  сечение фигуры плоскостью *XOY* имеет форму эллипса). Параметр *R* имеет тип одномерной функции. Для таких параметров ССС поддерживает графическое редактирование. На рис. 19 показано редактирование параметра Radius и соответствующая форма поверхности.

Естественно, поддерживаются и обычные числовые параметры, например, параметр *C* (Coefficient) в определении на рис. **Error! Reference source not found.**

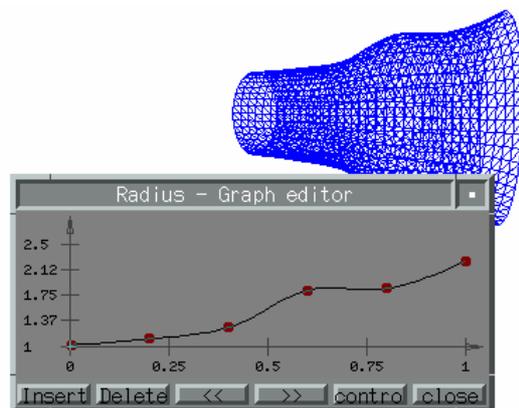


Рис. 19. Графическое редактирование функционального параметра **Radius** и соответствующая форма поверхности вращения

По процедурному описанию и заданным значениям параметров система генерирует представление соответствующей поверхности в виде треугольной сетки (рис. 19). Более сложные геометрические конструкции могут быть заданы как составные в виде совокупности из нескольких процедурных описаний. В составных процедурных описаниях могут использоваться общие параметры, что позволяет согласованным образом изменять форму и/или размер всей конструкции. Простой пример составной процедурной формы – трубка, составленная из двух концентрических цилиндров с боковыми сторонами в виде колец. Общими параметрами для всех элементов конструкции являются координаты ее центра и длина цилиндров. Внутренний и наружный радиусы трубки могут изменяться независимо (рис. 20).

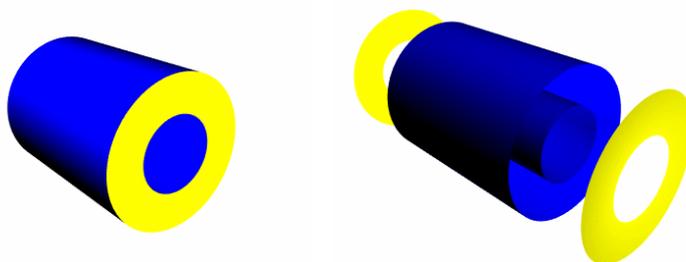


Рис. 20. Пример составной процедурной конструкции (справа показаны элементы конструкции – два цилиндра и два «кольца»)

В целом геометрия оптической модели может быть построена полностью на основе процедурных описаний или как сочетание процедурных форм и геометрии, импортированной из какой-либо САПР через форматы IGES, DXF, STEP и др.

### 3.2.3 Пример оптического моделирования с применением процедурных представлений

Рассмотрим простейший пример моделирования оптической системы PLE (Plane Light Emitter), в которой свет претерпевает многократные полные переотражения, распространяясь внутри прозрачной пластины. Этот пример иллюстрирует применение процедурной геометрии и процедурных текстур, а также в какой-то мере дает представление о процессе проектирования оптических устройств в системе SPECTER.

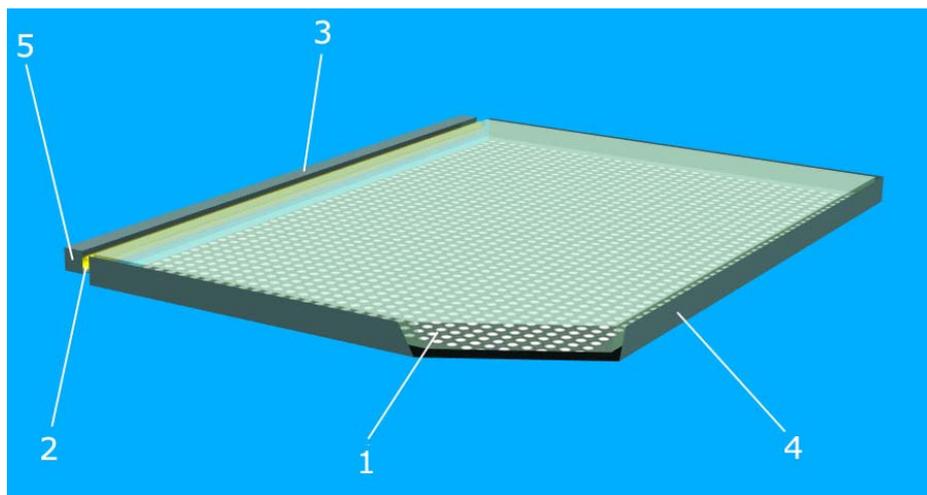


Рис. 21. Упрощенная схема устройства подсветки

На рис. 21 представлена упрощенная схема моделируемого устройства. Устройство состоит из следующих элементов:

1. Светопроводящая пластина (СПП) в форме параллелепипеда из прозрачного пластика, внутри которой свет распространяется путем многократных полных переотражений. На нижней стороне пластины нанесена сетка из диффузных пятен.
2. Источник света – люминесцентная трубка.
3. Рефлектор.
4. Боковые рефлекторы, возвращающие в систему свет, который выходит из нерабочих граней СПП. Находятся в непосредственной близости от СПП (для наглядности на рисунке удалены части боковых рефлекторов).
5. Два плоских зеркала с боковых сторон рефлектора (переднее зеркало на рисунке для наглядности частично удалено).

Процесс проектирования состоит из двух этапов. На первом этапе форма рефлектора 3 и его положение относительно других элементов системы подбираются таким образом, чтобы максимизировать поступление световой энергии на вход СПП. Цель второго этапа проектирования – добиться равномерной яркости на выходной поверхности устройства. Это достигается соответствующим подбором диаметров диффузных точек.

**Первый этап проектирования.** На этом этапе изменяется форма рефлектора и относительное положение лампы, рефлектора и светопроводящей пластины. Геометрия этих элементов описана в процедурной форме, ее редактирование производится путем изменения значений параметров.

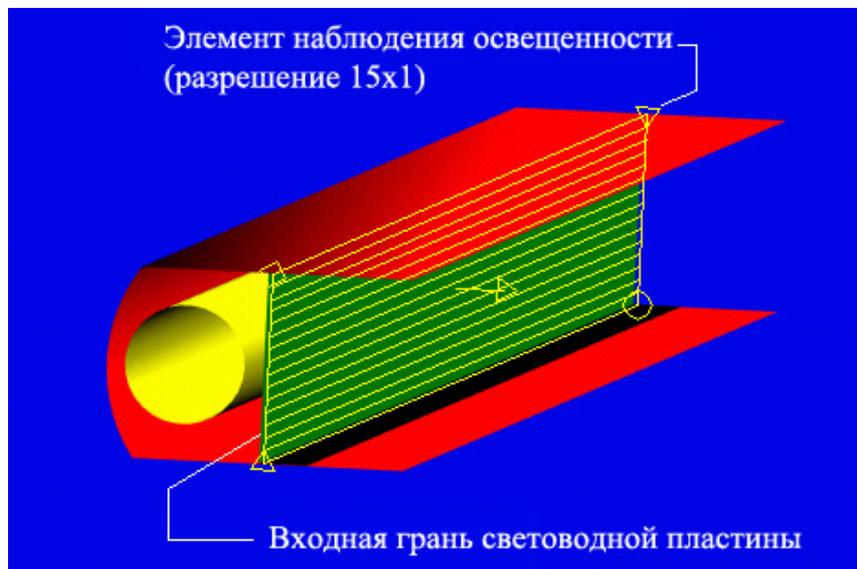


Рис. 22. Положение элемента наблюдения для анализа света, отражаемого рефлектором

Для оценки результата используется плоский элемент наблюдения освещенности. Элемент располагается параллельно входной грани СПП (рис. 22). Критерием проектирования на данном этапе является средний уровень освещенности, регистрируемый элементом наблюдения.

На рис. 23 показаны последовательные шаги проектирования формы рефлектора, а также взаимного расположения рефлектора, лампы и СПП.

1. В начале профиль рефлектора имеет прямоугольную форму [rect]. Средний уровень освещенности при этом составляет 75000 lux.
2. На следующем шаге моделируется рефлектор в форме цилиндра [circ], концентрического по отношению к лампе, что привело к снижению средней освещенности.
3. Приближение рефлектора к лампе [circsh] дало некоторое улучшение результата
4. Эллиптическая форма рефлектора [ellipse] обеспечивает более высокий уровень средней освещенности.
5. Вогнутая форма [evol1] позволяет достичь наилучшего результата при ограниченной ширине рефлектора (не превышающей толщину световодной пластины).
6. Увеличение ширины рефлектора [evol2] позволяет добиться дополнительного прироста освещенности.

7. Наконец, еще некоторое улучшение достигается за счет небольшого смещения светопроводящей пластины внутрь рефлектора [evol\_v\_pr].

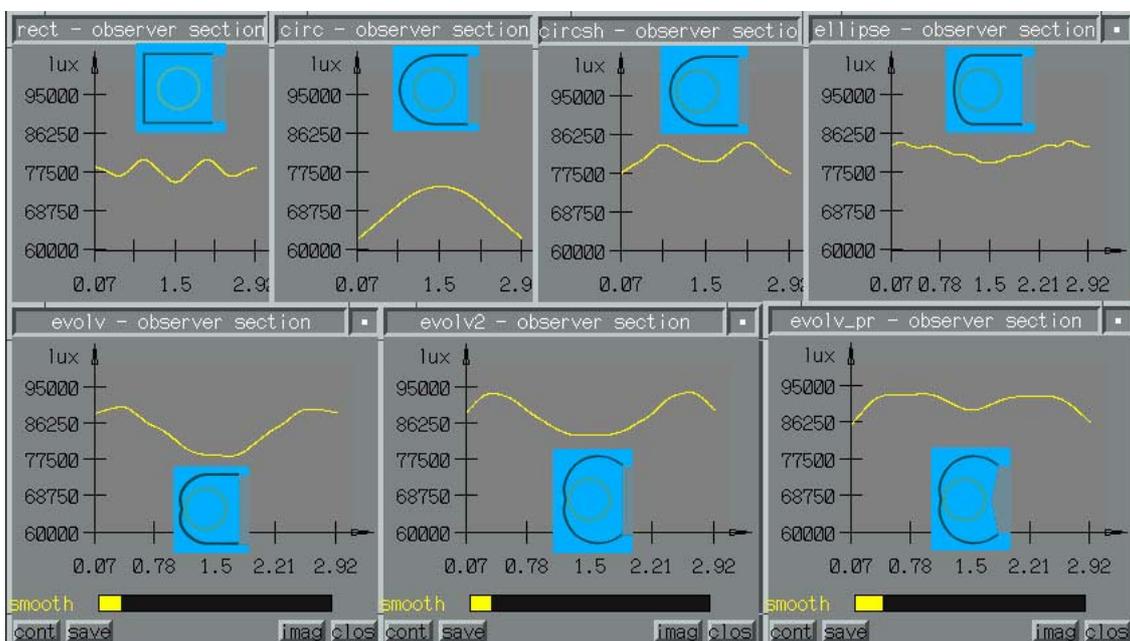


Рис. 23. Последовательные шаги проектирования рефлектора

На рис. 24 показаны изображения модели и соответствующие графики освещенности на элементе наблюдения, соответствующие начальному и конечному шагам проектирования.

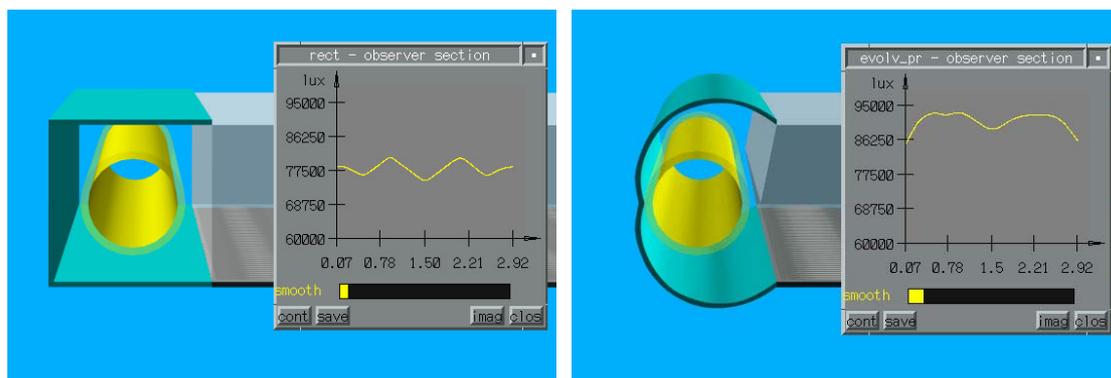


Рис. 24. Начальный и конечный шаги проектирования рефлектора

**Второй этап проектирования.** Цель второго этапа – добиться равномерной яркости на выходной поверхности устройства.

Рис. 25 иллюстрирует принцип работы оптической системы данного типа. Очевидно, что луч может покинуть светопроводящую пластину только через верхнюю грань, после диффузного отражения на одном из диффузных пятен

пластины (другие лучи распространяются под углами, превышающими угол полного внутреннего отражения, следовательно, не могут покинуть пластину). Таким образом, интенсивность выходного света в некоторой точке зависит от локальной плотности диффузной решетки в окрестности данной точки. С другой стороны, по мере удаления от входной грани пластины (у которой находятся лампа и рефлектор) световой поток ослабевает. Для того чтобы компенсировать этот эффект и добиться равномерного распределения яркости над выходной гранью, следует соответственно увеличивать плотность диффузной решетки. Отметим, что точное моделирование подобной системы требует учета огромного числа переотражений, претерпеваемых световыми лучами в реальном устройстве.

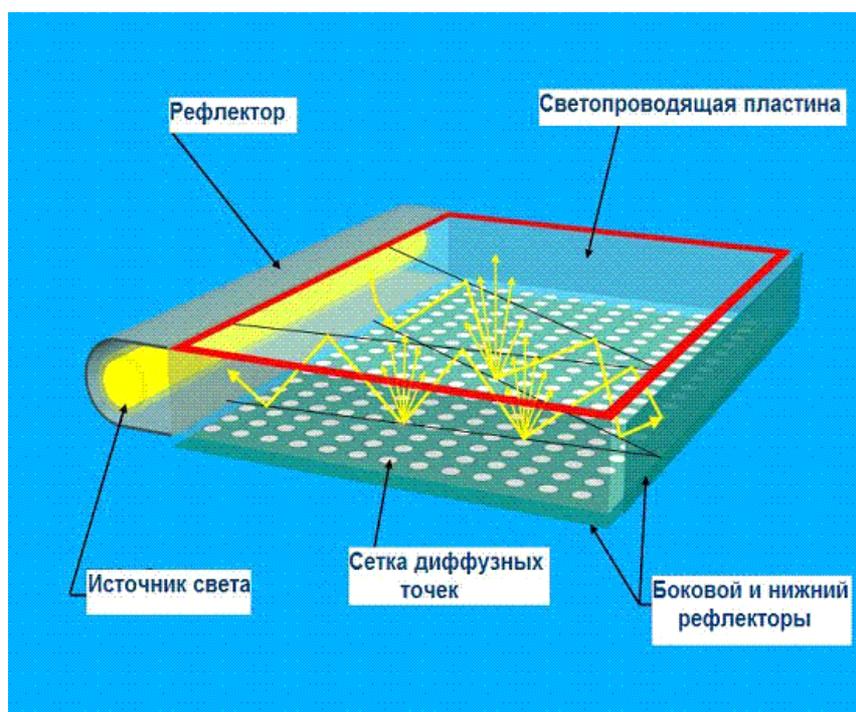


Рис. 25. Принцип действия устройства подсветки

Для анализа яркости используется плоский элемент наблюдения, расположенный над выходной гранью устройства.

Диффузная решетка в данной модели описана при помощи параметрической процедурной текстуры (см. пример в разд. 3.2.1). Требуемая зависимость диаметра точек от  $X$ -координаты на плоскости задается путем редактирования соответствующего функционального параметра **diameter** (рис. 17).

На рис. 26 показаны результаты моделирования для трех различных вариантов диффузной решетки. В верхней части каждого рисунка показано окно визуального редактора с графиком параметра-функции, описывающего зависимость диаметра диффузных участков от координаты  $X$ . В средней части показано изображение диффузной решетки (фрагменты, соответствующие левой, средней и правой части решетки). В нижней части каждого рисунка показан

график зависимости яркости на выходной грани устройства от координаты X, полученный при помощи элемента наблюдения.

**Начальный вариант.** Диаметр диффузных пятен постоянен. Видно, что яркость существенно неравномерна.

**Промежуточный вариант.** Диаметр диффузных участков увеличивается по мере удаления от лампы. Яркость на выходной грани устройства стала более равномерной.

**Окончательный вариант,** на котором достигнута практически равномерная яркость.

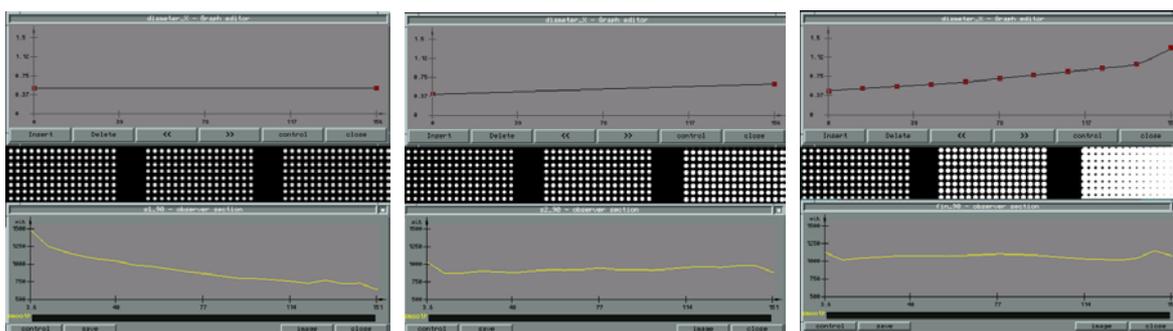


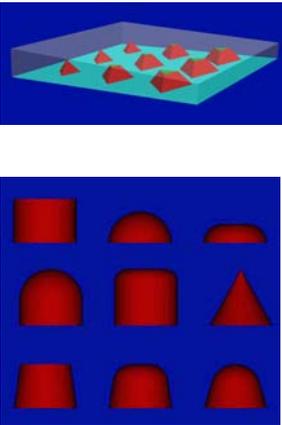
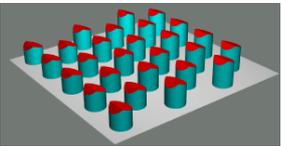
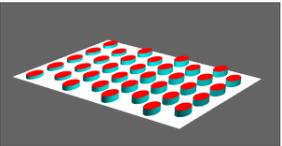
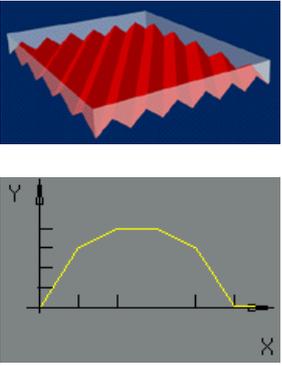
Рис.26. Результаты моделирования для трех различных вариантов диффузной решетки

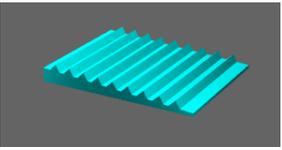
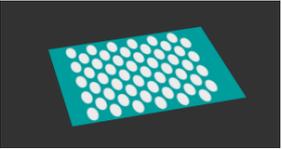
### 3.3 Генераторы поверхностей и текстур специального вида

Процедурные средства описания геометрии и текстур позволили успешно решать ряд задач оптического моделирования. Однако класс элементов со сложной структурой, которые можно эффективно описывать процедурными средствами, весьма узок. К тому же, определение геометрии и текстур в процедурной форме представляет значительные сложности для конечного пользователя, не имеющего достаточной подготовки в области программирования. Следующим шагом в развитии средств для спецификации элементов со сложной структурой в SPECTER стала реализация ряда встроенных модулей, позволяющих генерировать различные типы поверхностей, используемых в проектировании систем подсветки.

В табл. 1 показаны примеры поверхностей и текстур, генерируемых при помощи встроенных модулей. Практика создания сцен с применением встроенных модулей заключается в том, что сначала средствами какой-либо САПР создается базовая часть геометрии, которая затем дополняется элементами, сгенерированными при помощи встроенных модулей. Пользователю достаточно указать требуемый модуль и задать необходимые параметры. Параметры могут быть заданы в файле, и их также можно интерактивно изменять в SPECTER. По заданным параметрам встроенный модуль системы генерирует представление поверхности в виде треугольной сетки или текстуру.

**Таблица 1.** Примеры поверхностей и текстур, генерируемых встроенными модулями SPECTER.

	<p>1. Прямоугольная поверхность с множеством микроэлементов. Положение и форма каждого микроэлемента задаются индивидуально при помощи параметров. Нижняя часть микроэлемента имеет форму призмы, цилиндра или усеченного конуса, верхняя часть может быть закруглена. Нижний рисунок показывает примеры форм микровыпуклостей, которые могут быть заданы при помощи параметров.</p>
	<p>2. Прямоугольная поверхность с микроэлементами цилиндрической формы, расположенными в шахматном порядке. Верхняя часть микроэлемента образуется пересечением цилиндра с одной или двумя наклонными плоскостями.</p>
	<p>3. Прямоугольная поверхность с микроэлементами, расположенными в шахматном порядке и имеющими в основании форму эллипса. Верхние грани микроэлементов параллельны поверхности.</p>
	<p>4. Пластина, имеющая клинообразную форму или форму параллелепипеда или призмы без верхней грани с призматическим слоем (микробороздками) на нижней грани, а также четыре боковых поверхности пластины. (Верхняя грань может быть задана в модели отдельно – как плоский прямоугольник или также при помощи генератора как поверхность с микроэлементами.) Микробороздки могут быть направлены под углом к боковым сторонам. Профиль бороздок, общий для всей поверхности, может иметь сложную форму (см. нижний рисунок), которая задается в виде таблицы высот относительно основания.</p>

	<p>5. Пластина, имеющая клинообразную форму или форму параллелепипеда с микробороздками на верхней грани, расположенными параллельно одной из сторон. Положение и профиль каждой бороздки определяется индивидуально при помощи параметров, задающих координаты вершины и углы наклона двух ее боковых граней.</p>
	<p>6. Текстура для моделирования решетки диффузных точек, имеющих форму окружности или эллипса и расположенных в шахматном порядке. Расположение и размеры диффузных точек задаются индивидуально, в виде таблицы.</p>

### 3.4 OPTOS - оптические элементы

Генераторы элементов специального вида значительно расширили класс задач оптического моделирования, решаемых при помощи системы SPECTER. Тем не менее, в конечном счете, встроенные модули (как и генератор процедурной геометрии, рассмотренной в разд. 0) создают традиционные представления поверхностей в виде треугольной сетки. Это значит, что количество микроэлементов в модели реально ограничивается величинами порядка  $10^3$ , в то время как в реальных оптических устройствах количество микроэлементов может достигать величин порядка  $10^6 - 10^9$ . Кроме того, такое представление не обеспечивает эффективной трассировки лучей и не решает проблемы описания других классов оптически сложных компонентов, например, поляризационного рассеивания света в тонких пленках (фильтрах) и тому подобных явлений.

Для решения указанных проблем в разработанной системе оптического моделирования был предложен и реализован механизм *оптических элементов* (ОЭ) или OPTOS (сокр. от OPTical ObjectS). С точки зрения системы оптического моделирования, компонент модели, представленный в виде ОЭ, является объектом, который предоставляет программные интерфейсы для трассировки лучей по методу Монте Карло и методу излучательности. Благодаря унификации оптические объекты на самом деле могут использоваться с различными системами моделирования, действуя как «черные ящики», работающие как излучатели, преобразователи и накопители световой энергии. Унификация же позволяет достаточно легко расширять семейство оптических объектов – все, что требуется при разработке нового класса ОЭ – следование общим правилам их реализации и поддержка стандартных внешних интерфейсов.

Таким образом, ОЭ можно определить как объекты моделируемой оптической системы или устройства, которые позволяют использовать оптически

более сложные модели распространения света и свойства поверхностей, чем имеющиеся в программных комплексах оптического моделирования.

Рис. 27 иллюстрирует концепцию ОЭ. На этом рисунке оптически сложные микроструктурные рассеивающие объекты выносятся в некоторый специальный ОЭ со строго заданным интерфейсом. Только при попадании луча на этот элемент имеет смысл поиск пересечения луча с микрогеометрией. Получая на вход луч, этот объект должен обрабатывать его и выдавать на выход преобразованный луч. ОЭ имеет форму параллелепипеда и располагается вплотную к поверхности (рис. 27-б). В данном случае микрогеометрия расположена на дне светопроводящей пластины и служит для рассеивания и вывода света из нее. Перед попаданием на пластину луч попадет на ОЭ и будет соответствующим образом обработан, после чего продолжит распространение, выйдя из ОЭ (рис. 27-в).

В настоящее время SPECTER поддерживает оптические объекты, описывающие

- светорассеивающие поверхности с микрогеометрией,
- компоненты со свойствами объемного рассеяния света,
- поляризационные фильтры, описываемые двунаправленными функциями

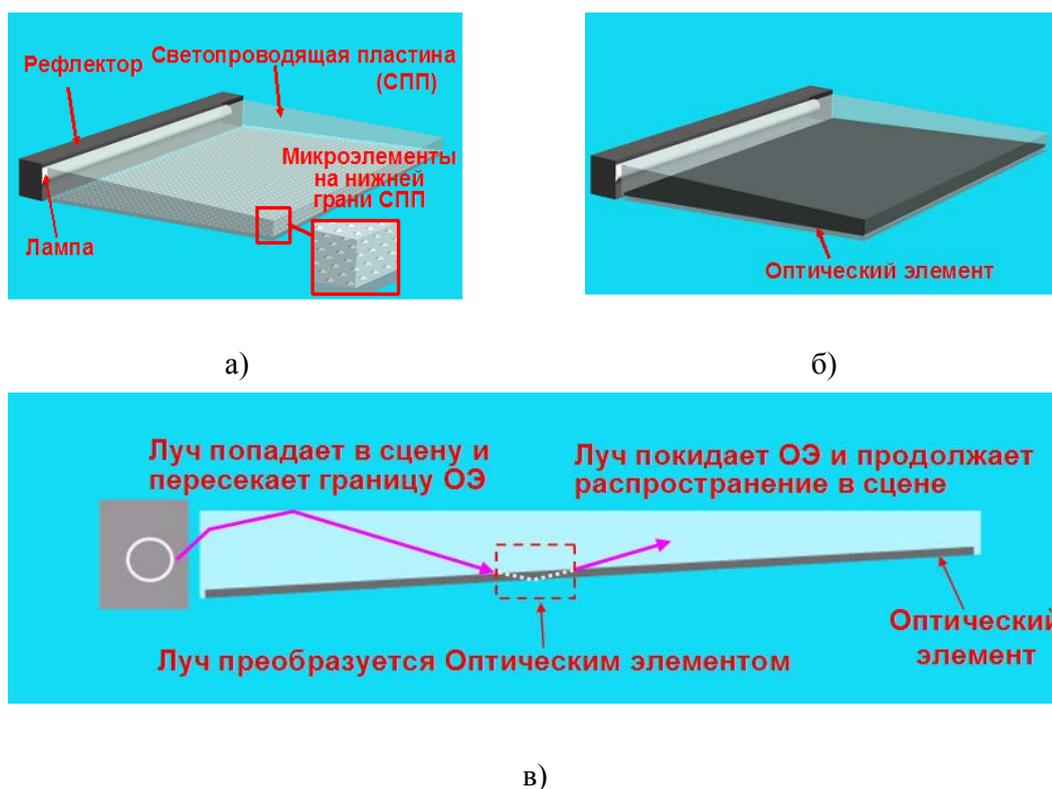


Рис. 27. Иллюстрация концепции оптического элемента:

- а) схема моделируемой осветительной части ЖК монитора с рассеивающей микроструктурой на нижней части светопроводящей пластины;
- б) оптический элемент охватывает микроструктурную часть светопроводящей пластины;
- в) иллюстрация механизма функционирования оптического элемента.

рассеяния (в англоязычной нотации - BSDF - Bi-Directional Scattering Distribution Functions) [5].

ОЭ могут использоваться в системе SPECTER совместно с геометрией, полученной другими путями, например, с помощью различных САПР.

Более подробно вопросы применения и реализации механизма оптических элементов изложены авторами в работах [5, 6].

## 4 Заключение

В работе рассмотрена система оптического моделирования SPECTER, разработанная в отделе машинной графики ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Эта система представляет собой программный инструмент для моделирования сложных оптических систем и устройств, основанных на таких оптических эффектах, как рассеяние света на микронеровностях поверхностей (стохастических или регулярных), объемное рассеивание света на микрочастицах материала, поляризационное рассеивание света в тонких пленках и др. В основе системы лежит алгоритм моделирования распространения света в заданной среде при помощи прямой трассировки лучей по методу Монте Карло. Система является развитием ранее разработанного коллективом программного комплекса, предназначенного для расчета освещенности и синтеза реалистичных изображений для архитектурных и дизайнерских приложений.

Рассмотрены реализованные механизмы описания и представления элементов моделируемых оптических систем и устройств, включая процедурное представление и генераторы поверхностей и текстур с использованием встроенных модулей.

Для моделирования оптически сложных эффектов, используемых в производстве современных жидкокристаллических мониторов, в разработанной системе применяются компоненты, называемые оптическими элементами (ОЭ). ОЭ предоставляют единообразные интерфейсы для трассировки лучей, а также других методов (визуализация, регенерация представления элемента при изменении параметров и др.), скрывая от системы оптического моделирования природу элемента и обеспечивая эффективную реализацию методов для работы с ним. Таким образом, ОЭ дают универсальный подход к расширению систем оптического моделирования средствами для поддержки оптически сложных эффектов различной природы. В настоящее время в SPECTER реализованы классы оптических объектов для моделирования поверхностей с разнообразными видами микрорельефа, материалов со свойствами объемного рассеяния света, сложных поляризационных фильтров.

Развитые средства для анализа результатов моделирования – элементы наблюдения – позволяют получать и исследовать различные виды распределений световой энергии в сцене, а также анализировать состояние поляризации света.

Элементы наблюдения поддерживают различные формы графического отображения результатов, предоставляют развитый механизм контроля точности расчетов.

Опыт практического применения системы показал, что СПЕКТЕР является эффективным инструментом для моделирования действительно сложных оптических устройств, соответствующих уровню сложности оптики, применяемой в современных жидкокристаллических мониторах и других аналогичных приборах. Сравнение результатов моделирования с данными измерений подтверждает корректность методов моделирования, применяемых в СПЕКТЕР. Эффективная реализация механизма ОЭ, а также применение параллельных и распределенных вычислений позволяет проводить расчеты за разумное время. Перспективы дальнейшего развития СПЕКТЕР связаны, прежде всего, с созданием новых классов оптических объектов и расширением функциональности существующих, а также с созданием более дружественного пользовательского интерфейса.

## Литература

1. Khodulev A., Kopylov E. Physically accurate lighting simulation in computer graphics software. Proc. GraphiCon'96 - The 6-th International conference on Computer Graphics and Visualization, St.Petersburg, 1996, p.111-119.
2. Волобой А.Г., Галактионов В.А. Машинная графика в задачах автоматизированного проектирования // "Информационные технологии в проектировании и производстве", № 1, 2006, с. 64-73.
3. А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, К.А. Дмитриев, Э.А. Копылов. Двухнаправленная трассировка лучей для интегрирования освещенности методом квази- Монте Карло. // "Программирование", № 5, 2004, с. 25-34.
4. Andrei B.Khodulev, E.Kopylov, Dmitry D.Zdanov. Requirements to the Scene Data Base. The 8-th International Conference on Computer Graphics and Visualization, Moscow, Russia, September 7-11, 1998, p. 189-195.
5. Sergey V. Ershov, Dmitry D. Zhdanov. Efficient application of Optical Objects in light simulation software. 15-th International Conference on Computer Graphics and Vision - GraphiCon-2005, Novosibirsk, 2005, p.284-292.
6. Волобой А.Г., Галактионов В.А., Жданов Д.Д. Технология оптических элементов в компьютерном моделировании оптико-электронных приборов // "Информационные технологии в проектировании и производстве", № 3, 2006, с. 46-56.