

В данной статье описаны принципы построения и реализации равномерного свечения фронтальной поверхности светильника переотраженного света, основанного на базе планарного световода. Описаны процессы формирования светимости фронтальной поверхности светильника, приведена математическая модель этого процесса, кратко описаны методы изготовления данной системы.

УДК 628.953

А. Г. Литвинов, тех. директор,
С. Н. Литовченко, гл. инженер,
ООО «СТУ»

А. А. Фомин, студент
Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВИМОСТИ ФРОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СВЕТИЛЬНИКА ПЕРЕОТРАЖЕННОГО СВЕТА

Введение. На текущий момент на рынке присутствует большое количество светильников, которые пришли на замену газоразрядным лампам, основным световым элементом которых являются светодиоды. Широко распространены модели светильников, конструктивная особенность которых заключается в том, что равномерный свет на всей фронтальной поверхности светильника формируется за счет равномерного распределения светодиодов на задней пластине корпуса, а также увеличением расстояния до фронтальной поверхности светильника. Конструкция представлена в виде прозрачной пластины с линзовой поверхностью (рис 1). Менее распространенными являются светильники с системой формирования фронтального свечения, основанного на акриловом световоде с торцевой засветкой. Основным принципом, на котором основана подобная система - эффект полного внутреннего отражения, представленного на рис. 2.



Рис. 1 - Светильник с тыльной засветкой

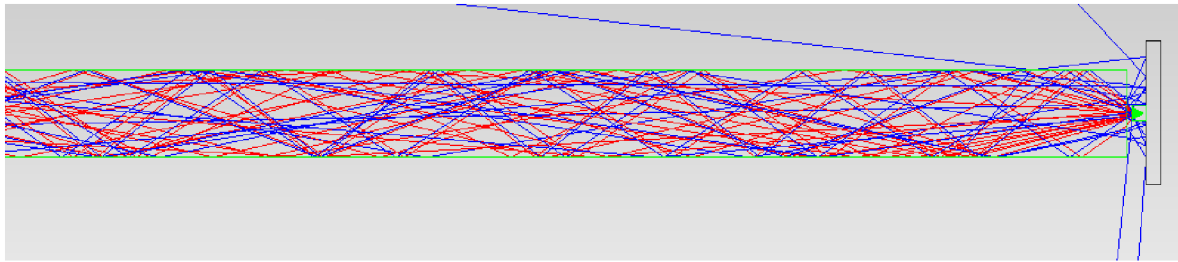


Рис. 2 - Распространение света в световоде без оптических неоднородностей

Обзор конструктивных особенностей.

Из световода с полным внутренним отражением световой поток возможно вывести только при наличии неоднородностей поверхности световода. Следовательно, на поверхности световода должны присутствовать зоны неоднородностей поверхности световода. В результате получаем, что каждая зона неоднородности может быть рассмотрена как точка, имеющая свои геометрические размеры, и рассматривается как отдельный источник излучения. Кроме геометрических параметров данная неоднородность обладает условной светимостью. Данная интенсивность свечения определяется количеством и интенсивностью лучей, попавших на данную неоднородность.

Процесс моделирования распространения интенсивности на поверхности светильника разбит на два этапа.

Световой поток выходит из системы планарного световода только через неоднородности поверхности световода. Задавая размеры и положение оптических неоднородностей возможно получение равномерного распределения интенсивности излучения выходящего из системы.

Рассмотрим дашпую систему для липейпой модели. То есть, имеем пекоторый световод с идеально ровной поверхностью на одной стороне и неоднородностями на другой. Неоднородности будут представлять собой вогнутые линзы (в случае обработки горячим прессом - испаренного), или термически разрушенная молекулярная структура материала (под действием лазерной обработки), или выпуклые линзы (нанесенные шелкографическим методом) материал, из которого выполнены выпуклые линзы, имеет показатель преломления не меньший показателя преломления Полиметилметалакрилата. ($n > 1.49303$)

Помимо световода в системе играют немалую роль и параметры вводимого излучения (света), а именно диаграмма направленности света светодиода. Для дальнейшего моделирования излучение светодиода представим как совокупность лучей, имеющих свою интенсивность и угол отклонения относительно оптической оси световода. При вводе излучения в светопроводящую пластину лучи подвергаются корректировке угла отклонения при переходе через 2 среды с различными показателями преломления (закон Снеллиуса) [1].

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

Рассмотрим каждый луч в отдельности. В зависимости от угла входа в систему он может распространяться по одной из трёх возможных траекторий:

- луч сразу попадает в точку неоднородности и точка, преломляя луч, становится точечным источником света, при этом луч, потеряв большую часть энергии, продолжает движение до пересечения с последующей точкой и так далее;
- при первом преломлении луч не попадает на неоднородность и продолжает движение по траектории до пересечения с последующими неоднородностями или же

луч проходит всю систему, не пересекаясь с зонами неоднородности;

- прохождение луча через систему не подвергается переотражениям, следовательно, луч не передает световую энергию в точки неоднородности. Интенсивность светового потока таких лучей считается потерями в системе световода.

В итоге интенсивность излучения переотраженного света в каждой точке неоднородности представляет собой суперпозицию интенсивностей, попавших на данную неоднородность лучей от источника света. Таким образом, меняя плотность расположения точек неоднородностей, можно добиться максимально возможного переотражения светового потока, введенного от источника света. А для равномерного распределения интенсивности переотраженного света применяют динамические радиусы точек неоднородности. Чем дальше от источника света, тем меньше лучей попадает на плоскость неоднородности, следовательно, площадь неоднородностей должна увеличиваться пропорционально расстоянию от края пластины.

В результате математического моделирования распространения лучей для размеров световода 575x575x3 и линейной модели распространения света, получаем зависимость интенсивности от расстояния между точкой переизлучения и источником света (рис.3).

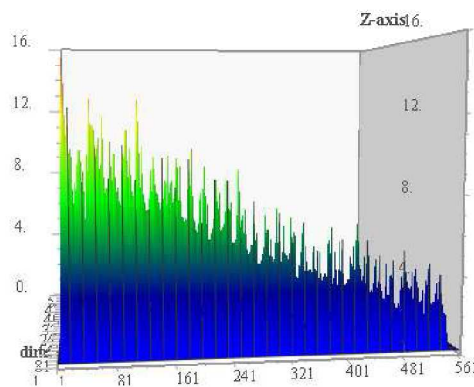


Рис. 3 - Распределение интенсивности переизлучения в узлах неоднородностей

Поскольку излучение от одного источника света не влияет на характер излучения пересекаемых лучей, то в случае, если с противоположных сторон использовать подобные источники света, на точках переотражения получим суммарную интенсивность светового потока от двух источников (рис. 4). Модель представляет собой сумму значений двух встречных зависимостей распределения интенсивности от расстояния до края пластины. Размеры световода, рассматриваемые в модели: 575x575x3.

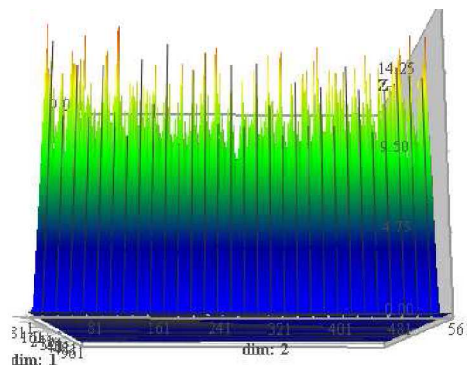


Рис. 4 - Распределение интенсивностей света на узлах неоднородностей в линейной системе при встречной засветке

Аналогичные принципы сохраняются и для системы с четырехсторонней засветкой, интенсивность свечения каждой точки неоднородности будет равна интенсивности всех лучей, попавших в данную точку от четырех источников.

Последующий этап формирования равномерной засветки всей фронтальной поверхности светильника. Рассмотрим точки переотраженного света как первоисточник излучения. В таком случае в первом приближении имеем светильник с плотно посаженными точечными источниками света. Для получения равномерного излучения со всей поверхности используем молочно-белую шероховатую пластину поликарбоната для дополнительного рассеивания света.

Рассмотрим ход луча от узла неоднородности до фронтальной поверхности светильника, который представлен на рис.5.

Стоит напомнить, что точки неоднородности поверхности наносят на заднюю сторону пластины световода, то есть вектор света будет проходить через пластину толщиной L , через воздушный зазор и через белую пластину толщиной порядка 1.5мм. Таким образом, луч пройдет расстояние 5.5-7.5 мм минимум (в зависимости от толщины используемой световодной пластины).

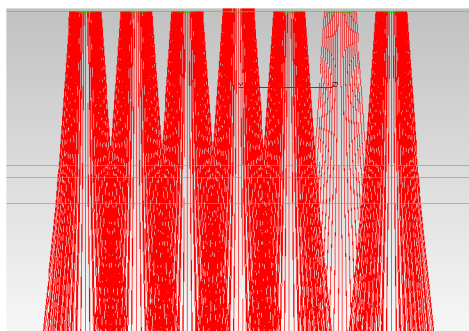


Рис. 5 - Модель распространения света от точек неоднородности при рассмотрении их как самостоятельные источники

При любом процессе формирования неоднородностей на поверхности пластины световода, данные неоднородности будут представлять собой вогнутые линзы с некоторой глубиной, радиусом линзы и радиусом кривизны линзы. Вышеперечисленные параметры дают возможность геометрически рассчитать радиус пятна света, полученного на фронтальной поверхности светильника от одной точки неоднородности.

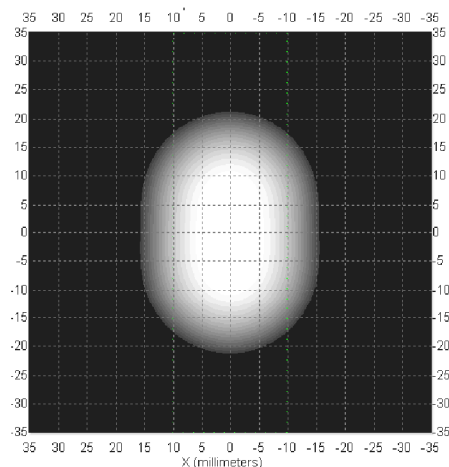


Рис. 6 - Интенсивность света на фронтальной поверхности, при моделировании 7 точек неоднородностей расположенных в один ряд

Таким образом, получаем сглаживание интенсивности излучения фронтальной поверхности относительно интенсивности точек неоднородностей.

Математическая модель. Описание программы.

Для математического моделирования была разработана и реализована программа на языке программирования Fortran 95.

Исходные данные, геометрические размеры и прочие показатели необходимые для расчета и математического

$L = 570\text{мм}$ длина пластины

$n_2 = 1.49303$ показатель преломления материала ПММА

$h = 4(6)\text{мм}$ толщина пластины

$z_0 = 4.2\text{мм}$ отступ от края пластины до начала рисунка

$R_{min} = 0.15\text{мм}$,

$R_{max} = 0.45\text{мм}$ минимальный и максимальный радиус точки неоднородности

$dl = 1.5\text{мм}$ расстояние между точками неоднородностей

$N_{луч} = 1000$ количество лучей на которые разбивается источник света (чем больше лучей, тем больше расчетная точность)

$H_{линзы} = 0,05\text{мм}$ – глубина линзы неоднородности

$Z_{аз} = h + 0.5 + 1.5$ – толщина световода + зазор + толщина рассеивателя.

Исходные данные про источник света:

$LMWT = 120$ светопередача светодиодов (люмен/ват)

$POW = 45$ мощность источника

$\theta = 55^\circ$ угол раскрытия светодиода

$\Delta = 92\%$ коэффициент светопропускания в Полиметилметалакрилате, заявленный производителем.

Расчет мощности светового потока в люменах:

$$Potok = LMWT * POW * \Delta / 100 \quad (2)$$

Расчет количества точек исходя из геометрии пластины:

$$N = \frac{L - z_0 * 2}{dl} \quad (3)$$

Сформируем массив данных и произведем принудительное обнуление первичных данных массива:

$$Int_{N,N} = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Шаг изменения угла отклонения луча, рассчитывается исходя из угла раскрытия светодиода и количества лучей:

$$Step = \frac{\theta}{N_{луч}} \quad (5)$$

Рассмотрим каждый луч как некий вектор, имеющий угол отклонения от продольной оси и имеющий свою интенсивность светового потока.

Вычислим угол отклонения данного вектора, при переходе двух сред с различными показателями преломления, луч подвергается некоторому отклонению, которое вычисляем по закону Снеллиуса[1].

$$\theta' = \text{asin}\left(\frac{\sin(\theta)}{n_2}\right) \quad (6)$$

Определим интенсивность луча по формуле, которая описывает кривую диаграммы направленности светодиода (см. паспортные данные светодиода).

$$\text{Int}_\theta = f(\theta) \quad (7)$$

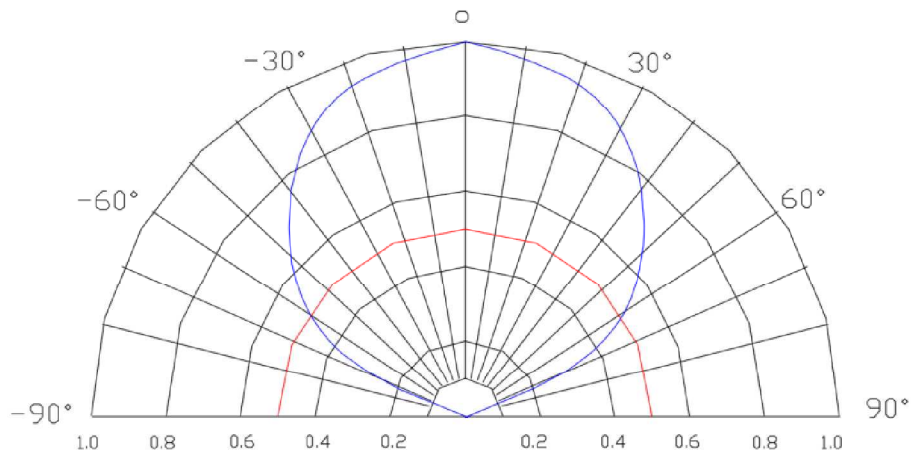


Рис. 7 - Кривая силы света источника светодиода (паспортные данные)

Вычислим расстояние, на котором луч первый раз пересечется с границей пластины:

$$Dx = \frac{h}{2} * \frac{1}{\tan(\theta)}. \quad (8)$$

Определим в какую из точек неоднородности попадает вектор – луч. Поскольку система симметрична, то возможно одновременное рассмотрение двух лучей с отклонением на одну и ту же величину, но с разными знаками.

$$Dx1 = |Dx * (k * 4 + 1) - z0 - dl * i| \quad (9)$$

$$Dx2 = |Dx * (k * 4 + 3) - z0 - dl * i| \quad (10)$$

где k - количество проходов луча;

i - номер точки неоднородности.

Поскольку количество лучей, попадающих на поверхность световода, уменьшается с увеличением расстояния, необходимо увеличивать радиус точек неоднородностей для обеспечения равномерного распространения световой интенсивности по фронтальной поверхности световода.

Радиус точек увеличивается с продвижением в центр пластины, рассчитаем текущий радиус точки:

$$R_n = R_{max} - \left| \frac{R_{max} - R_{min}}{N} * (i * 2 - N) \right| \quad (11)$$

Проверяем попал ли луч в текущую точку неоднородности:

$$|Dx1_n| < R_n. \quad (12)$$

В случае, если луч попал в точку неоднородности, он отдает часть своей интенсивности точки и продолжает свое движение до следующего пересечения с точкой неоднородности:

$$In_n = Int_\theta, \quad (13)$$

In_n – интенсивность света в узле неоднородности;

Int_θ – интенсивность луча источника, отклоненного от оси на угол θ .

В случае, если луч не попал ни в одну неоднородность, его интенсивность не передается точкам, и подобные лучи являются составляющей потерь в данной системе.

Поскольку система симметрична и подобна для каждого отдельного источника света, то следовательно можно рассчитать интенсивность света в каждой точке неоднородности по всей поверхности пластины ПММА.

$$Int_{i,j} = In_i + In_j + In_{N-i} + In_{N-j} \quad (14)$$

Рассчитав интенсивность в каждой точке неоднородности, необходимо смоделировать интенсивность светового потока на фронтальной поверхности светильника.

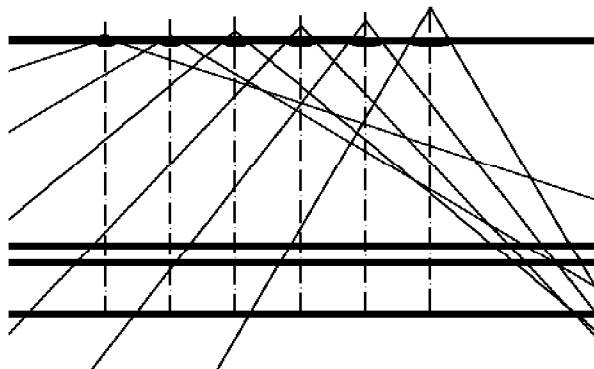


Рис. 8 - Модель распространения света от узлов неоднородностей до фронтальной поверхности светильника

В зависимости от параметров точек неоднородности рассчитаем радиус кривизны сформированной линзы.

Пропорциональное увеличение площади пятна света, полученное из радиуса пятна неоднородности, фокусного расстояния линзы и толщины пластины ПММА.

Следовательно, интенсивность пятна будет выражена в виде:

$$\frac{dI}{dx} = Int_{i,j} \quad (15)$$

В пределах отклонения интенсивность в каждой точке поверхности будет выражена в виде:

$$I_{x,y} = \int_{y-\Delta}^{y+\Delta} \int_{x-\Delta}^{x+\Delta} \frac{Int_{x,y}}{\Delta^2} dx dy \quad (16)$$

Получаем, что свет от одной из точек, формируется в пятно с радиусом в 2-5 раз большим радиуса точки. Переформируем распределение интенсивности светового потока, с учетом поправки на увеличение светящегося пятна на фронтальной поверхности светильника.

Поскольку все выше перечисленные расчеты приводились в относительных единицах, следует ввести коэффициенты для приведения их к реальным показаниям, для этого определим максимальное значение интенсивности при использовании относительных единиц:

$$Int_{max} = MAX((Int_{i,j}), \quad (17)$$

Тогда максимальное значение, равное единице, будет при максимальном значении точки в относительных единицах:

$$Int_{i,j} = (Int_{i,j}/Int_{max}) * Поток/N^2. \quad (18)$$

Методы реализации линзовых поверхностей

Методы изготовления линзовой поверхности на световоде: лазерная гравировка, шелкография, пескоструйный. Рассмотрим каждый из методов: его достоинства и недостатки.

Лазерное нанесение линзовой поверхности на световоде ПММА.

Растровым методом, с помощью CO² лазера на поверхность ПММА наносят рисунок линзовой поверхности. В процессе гравирования на поверхности световода формируются линзы за счет оплавления и частичного испарения материала, при этом возникают термические напряжения в материале. Что бы избежать растрескивания материала необходимо проводить термический отпуск материала. За счет растрового выполнения рисунка и малого размера фокусной точки узлы неоднородности имеют форму ромба, а не окружности, что не позволяет рассматривать систему анизотропной в одной плоскости.

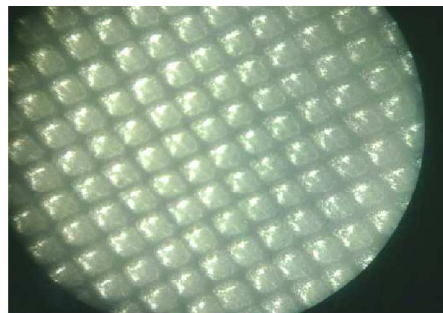


Рис. 9 - Поверхность световода после лазерной обработки (увеличение x12)

Шелкография.

Метод заключается в нанесении краски (лака) на поверхности световода через шелковый трафарет - маску.

Поскольку краска имеет показатель преломления выше показателя преломления пластины ПММА, то лучи так же будут выходить из системы световода, то есть эффект для вогнутых и выпуклых линз будет сопоставимо равным. Основным достоинством метода является высокая продуктивность и низкая стоимость производства, а так же возможность подбора материалов для нанесения рисунка.

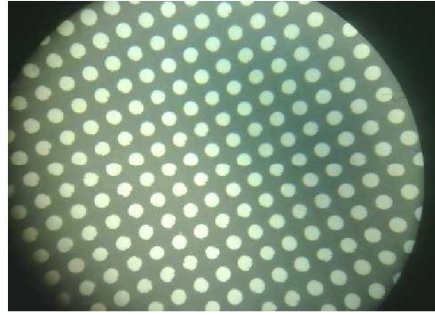


Рис. 10 - Поверхность световода с рисунком линзовых неоднородностей, выполненных шелкографическим методом

Сравнение результатов математической модели и измеренных параметров.

Целью данного исследования является получение равномерности свечения фронтальной поверхности светильника. В результате математического моделирования получаем распределение интенсивности свечения фронтальной поверхности с разбросом не более 10% (рис.11).

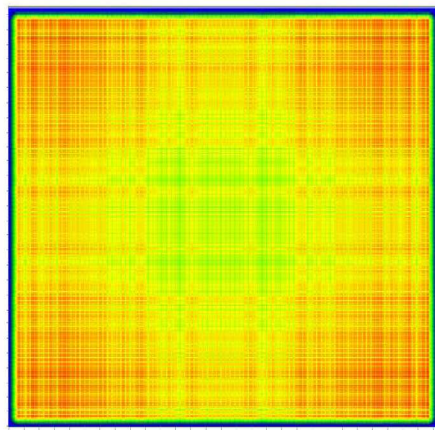


Рис. 11 - Расчетное распределение интенсивности на поверхности светильника

Изготовив экспериментальную модель данной системы распределения светового потока и измерив интенсивность по всей плоскости свечения получаем график распределения (рис. 12).

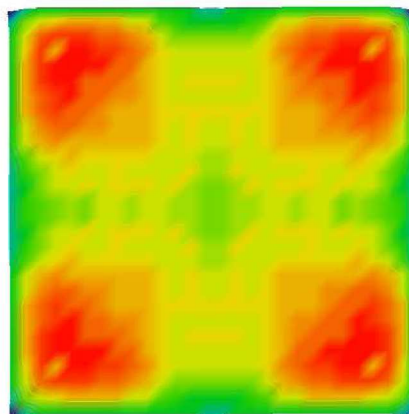


Рис. 12 - Распределение интенсивности на фронтальной поверхности экспериментальной модели светильника

В результате данного исследования была получена приведенная математическая модель для расчета равномерного распределения светимости фронтальной поверхности светильника. Отклонение результатов математического расчета от экспериментальных не превышает 10%, а разность показания светимости фронтальной поверхности между максимальной и минимальной интенсивностью свечения не более 15%.

Литература:

1. Калитеевский Н. И. Волновая оптика. – М.: Высш. школа, 1995.
2. <http://www.lambdares.com/tracpro>
3. Афанасьев В.А. Оптические измерения. 1981
4. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов – М.: Машиностроение, 1989.

ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РІВНОМІРНОГО РОЗПОДІЛУ СВІТИМОСТІ ФРОНТАЛЬНОЮ ПОВЕРХНЕЮ СВІТИЛЬНИКА ВІДБИВАЮЧОГО СВІТЛА

О. Г. Литвинов, С. М. Літовченко, О. О. Фомін

Описано принципи побудови та реалізації рівномірного світіння фронтальної поверхні світильника відбиваючого світла, заснованого на базі планарного світловода. Описано процеси формування світимості фронтальної поверхні світильника, наведена математична модель цього процесу, коротко описані методи виготовлення даної системи.

CONSTRUCTING OF THE MATHEMATICAL MODEL UNIFORMLY DISTRIBUTED LUMINOSITY OF THE FRONT SURFACE LAMP RE-REFLECTED LIGHT.

O. G. Lytvynov S. M. Litovchenko. O. O. Fomin

This article describes the principles of constructing and implementation of a uniform luminescence of the front surface of the lamp re-reflected light based on the basis of a planar fiber. Also the articles describes the processes of formation of the luminosity front surface lamp, the mathematical model of this process and also in short are given the methods of system manufacture.