

В. Е. УДАЛЬЦОВ, А. А. УВАРОВА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЕТОДИОДАХ

Рассматривается физико-математическая модель светодиода в корпусе ТО-1, в качестве параметров которой использованы геометрические размеры кристалла и элементов корпуса, показатели преломления и коэффициенты поглощения материала корпуса кристалла. При решении задачи распространения излучения учтены процессы отражения от основания корпуса, цилиндрической и сферической поверхностей купола, эффекты преломления лучей на указанных поверхностях, поглощение излучения в кристалле и материале корпуса. Приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных диаграмм направленности излучения светодиода КИПД-21К.

Ключевые слова: диаграмма направленности излучения светодиода, математическая модель, эффективность излучения светодиода.

Введение. В настоящее время конструирование и производство мощных светодиодов является приоритетным направлением работ ведущих фирм. Это связано с тем, что светоотдача современных светодиодов превышает светоотдачу ламп накаливания, а в ближайшем будущем превысит и светоотдачу люминесцентных и газоразрядных ламп при значительно большем сроке службы [1].

Как известно, эффективность излучения светодиодов определяется в основном двумя факторами: качеством исходной светодиодной структуры и оптическими параметрами корпуса прибора [2, 3]. Свойства светодиодных структур, их внутренний квантовый выход зависят от состава примесей и способов легирования полупроводников, а также от типа контактной системы. Эти параметры оптимизируются на этапах выращивания эпитаксиальных слоев и изготовления кристаллов для светодиодов. Все параметры, определяющие качество светодиодных структур, как правило, заранее заданы.

Кристаллы светодиодов, используемые в серийном производстве, в большинстве своем имеют форму параллелепипеда. Диаграмма направленности излучения кристалла близка к диаграмме равномерного источника; отличия от закона Ламберта связаны с эффектами отражения и преломления лучей на границах раздела сред и влиянием непрозрачного верхнего электрода. Эту зависимость можно оценить теоретически [4] или исследовать экспериментально [3] и учитывать при разработке конструкции прибора.

Способ сборки и параметры корпуса прибора определяют направленность (угол) излучения и максимальную силу света, относящиеся к основным светотехническим параметрам светодиодов. Таким образом, для построения математической модели светодиода и расчета диаграммы направленности его излучения необходимо знать индикатрису излучения кристалла и основные параметры выбранного корпуса, определяющие условия отражения и фокусировки излучения.

Параметры модели корпуса типа ТО-1, имеющего цилиндрическую симметрию, приведены на рис. 1. Основными элементами конструкции являются излучающий кристалл $S—S'$, установленный на металлическую отражающую поверхность в виде усеченного конуса OFD , называемую фарой, и пластмассовый корпус в виде купола ABC . Корпус изготавливается в виде цилиндра или конуса высотой H_k , сопряженного со сферической фокусирующей поверхностью AB . При трансферном прессовании корпуса в разъемные формы боковая поверхность корпуса изготавливается в виде цилиндра, если же герметизация прибора выполняется методом заливки жидкого компаунда в литьевые формы, то для удобства извлечения корпуса из формы поверхность его выполняется в виде конуса с минимальным углом наклона образующей по отношению к оси прибора.

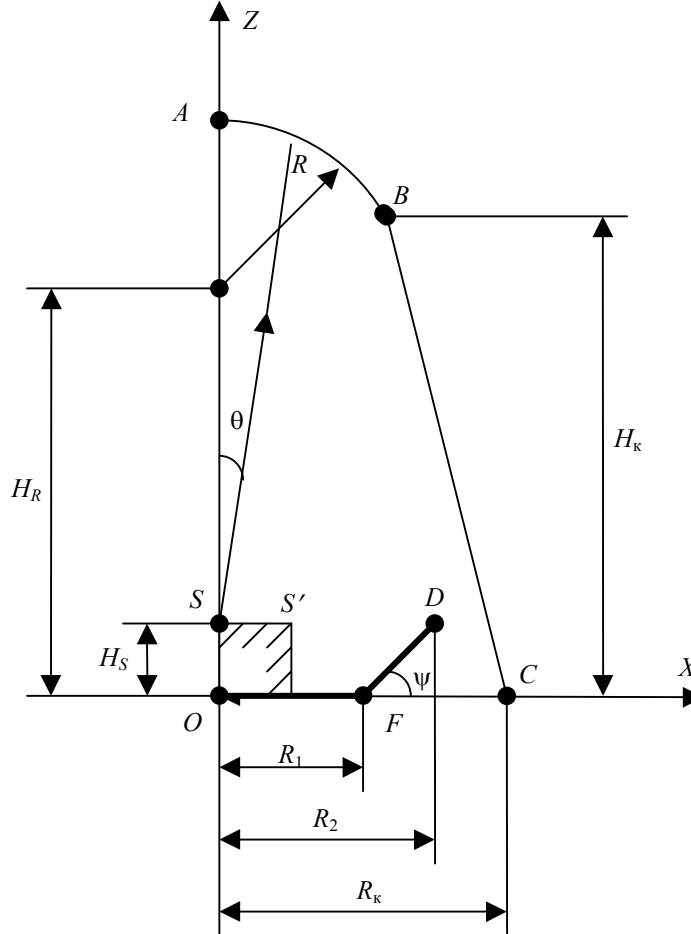


Рис. 1

Описание хода лучей в корпусе типа ТО-1. При расчете диаграммы направленности излучения светодиода указанной конструкции предполагается, что кристалл излучает монохроматический свет, как массив точечных источников с координатами X_S и Z_S . Ось Z является осью симметрии корпуса, поэтому достаточно учесть только излучение источников с координатами $X_S > 0$ и построить диаграмму направленности излучения в первом квадранте выбранной системы отсчета.

В зависимости от угла излучения θ возможны следующие варианты распространения излучения:

- 1) при $\cos \theta > 0, \sin \theta > 0$ луч направлен вправо и вверх;
- 2) при $\cos \theta < 0, \sin \theta > 0$ луч направлен вправо и вниз;
- 3) при $\cos \theta > 0, \sin \theta < 0$ луч направлен влево и вверх;
- 4) при $\cos \theta < 0, \sin \theta < 0$ луч направлен влево и вниз.

В первом случае необходимо учитывать либо отражение от границы DF , либо отражение и преломление на участке BC , либо отражение и преломление на участке AB ; во втором случае — либо отражение от поверхностей OF или DF , либо отражение и преломление на участке BC ; в третьем случае учитываются эффекты прохождения луча через поверхность OA , отражение и преломление на участке AB , при этом эффект прохождения луча через поверхность OA эквивалентен отражению луча от этой поверхности, поскольку вследствие изотропности источника лучу, падающему справа на поверхность OA под углом $-\theta$, всегда найдется луч, выходящий слева через OA под углом θ ; в четвертом случае учитывается только эффект отражения от поверхности OF и не учитываются эффекты отражения от поверхностей DF и FC слева как маловероятные.

Первоначальное направление луча задается углом θ (рис. 2):

$$\theta = \theta_0 + \pi/K,$$

где K — число разбиений по углу θ (целое число, кратное 360).

При этом траектория распространения луча в координатах Z, X определяется уравнениями

$$\left. \begin{aligned} Z &= r \cos \theta, \\ X &= r \sin \theta \end{aligned} \right\}$$

или $X = Z \operatorname{tg} \theta$.

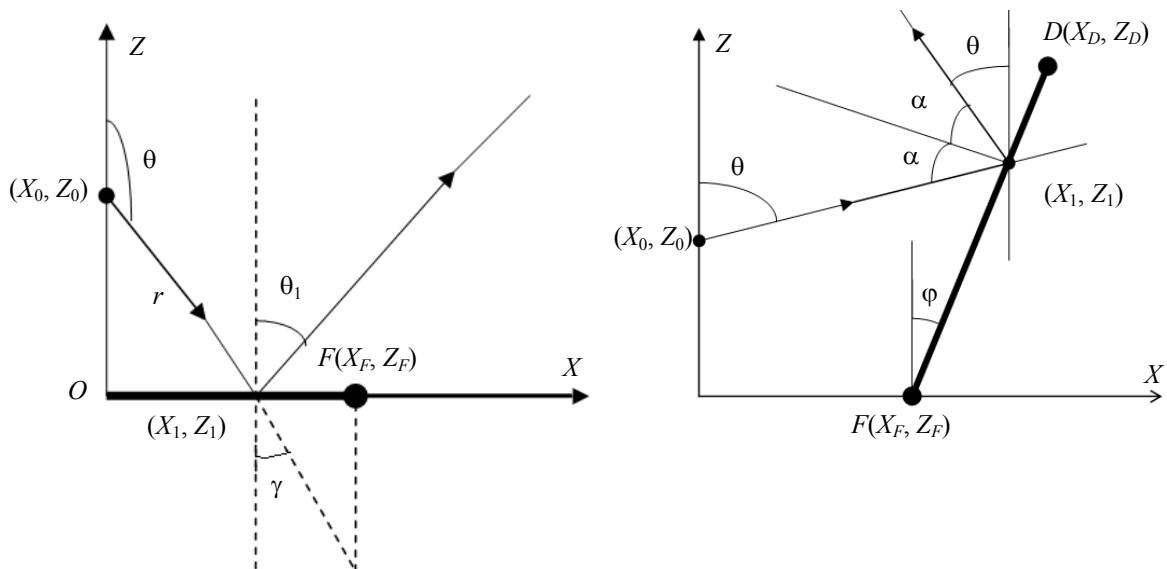


Рис. 2

В зависимости от заданного направления луча определяется точка его пересечения с отражающей поверхностью и ее координаты (X_1, Z_1) . После этого определяются угол α падения луча, угол θ_1 отражения луча относительно оси Z и угол γ преломления луча относительно оси Z . Угол γ является углом, под которым луч выходит из корпуса прибора.

Интенсивность света I на расстоянии r от источника определяется на основе закона поглощения Бугера — Ламберта:

$$I = I_0 \exp(-\chi r),$$

где I_0 — интенсивность света в точке с координатами (X_0, Z_0) , χ — коэффициент поглощения.

Расстояние r от точки (X_0, Z_0) до точки (X_1, Z_1) рассчитывается по формуле

$$r = \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Z_1 - Z_0)^2}.$$

Если имеет место отражение луча от поверхностей OF или DF , то интенсивность отраженного излучения уменьшается в ρ раз: $I_1 = I\rho$, где ρ — коэффициент отражения поверхности. Если же поверхность прозрачна, т.е. имеет место отражение и преломление, коэффициент отражения рассчитывается по известной формуле Френеля:

$$\rho = 0,5 \left\{ \left[\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 + \left[\frac{\operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)} \right]^2 \right\}.$$

Интенсивность преломленного излучения $I_2 = I(1 - \rho)$.

При уменьшении интенсивности излучения вследствие указанных эффектов более чем в 20 раз (до 5 %) оно не учитывается в выходящем потоке света.

Эффекты отражения и преломления лучей поверхностями. Отражение и преломление лучей поверхностями рассчитывается по законам геометрической оптики, которые применительно к данной задаче приводят к следующим формулам для угла отражения θ_1 .

1. *Отражение от поверхности OF* (см. рис. 2). Полагая $X = X_F$, находим

$$Z = Z_0 + (X_F - X_0) / \operatorname{tg} \theta.$$

Если $Z > 0$, то луч не попадает на отражающую поверхность OF ; если $Z < 0$, то имеет место отражение от поверхности OF в точке с координатами $X_1 = X_0 - Z_0 \operatorname{tg} \theta$, $Z_1 = 0$. Угол отражения $\theta_1 = \pi - \theta$.

2. *Отражение от поверхности DF* (см. рис. 2). Полагая $X = X_D$, находим

$$Z = Z_0 + (X_D - X_0) / \operatorname{tg} \theta.$$

Если $Z > Z_D$ или $Z < 0$, то луч не попадает на отражающую поверхность DF ; если же $0 < Z \leq Z_D$, то имеет место отражение от поверхности DF в точке, которая определяется из решения системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} Z &= Z_0 + (X - X_0) / \operatorname{tg} \theta; \\ Z &= Z_F + (X - X_F) / \operatorname{tg} \varphi, \end{aligned} \right\}$$

где $\operatorname{tg} \varphi = (X_D - X_F) / (Z_D - Z_F)$.

Отсюда следует, что координаты точки пересечения луча с поверхностью определяются уравнениями

$$X_1 = X_0 + (Z_1 - Z_0) \operatorname{tg} \theta,$$

$$Z_1 = (X_0 - X_F + Z_F \operatorname{tg} \varphi - Z_0 \operatorname{tg} \theta) / (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \theta).$$

Угол отражения $\theta_1 = 2\varphi - \theta$.

3. *Отражение и преломление лучей поверхностью OA* (рис. 3). Полагая $Z = Z_A$, находим

$$X = X_0 + (Z_A - Z_0) \operatorname{tg} \theta.$$

Если $X < 0$, то имеет место отражение и преломление лучей поверхностью OA . Точка пересечения будет иметь координаты

$$X_1 = 0, \quad Z_1 = Z_0 - X_0 / \operatorname{tg} \theta.$$

Угол отражения $\theta_1 = -\theta$.

4. *Отражение и преломление лучей на границе раздела сред BC* (см. рис.3). Точка пересечения луча с поверхностью BC определяется из решения системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} X &= X_C + (Z - Z_C) \operatorname{tg} \varphi; \\ X &= X_0 + (Z - Z_0) \operatorname{tg} \theta, \end{aligned} \right\}$$

где φ — угол наклона поверхности BC относительно оси Z .

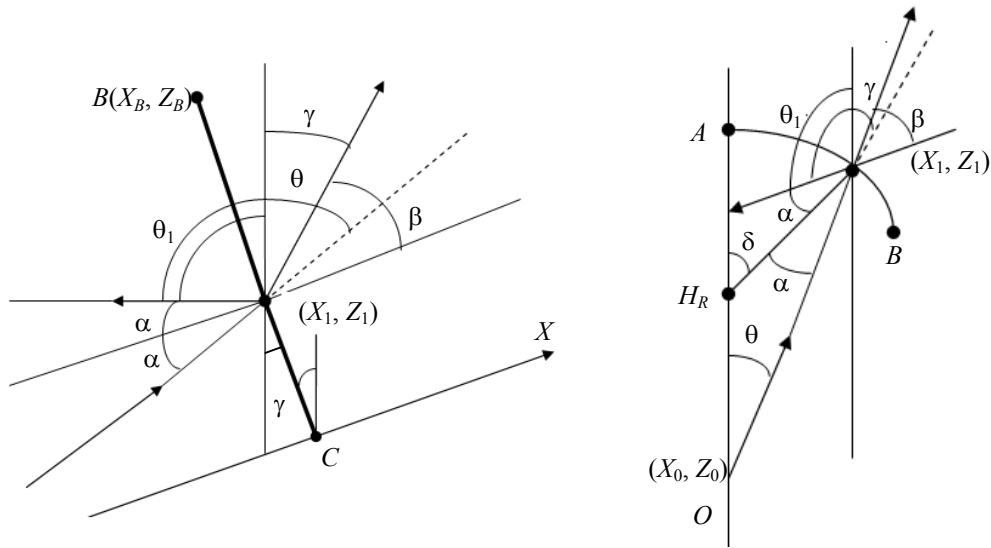


Рис. 3

Как следует из рис. 3, $\operatorname{tg} \varphi = (X_B - X_C) / (Z_B - Z_C)$. Координаты (X_1, Z_1) точки пересечения луча с поверхностью BC определяются выражениями

$$X_1 = X_0 + (Z_1 - Z_0) \operatorname{tg} \theta, \quad Z_1 = (X_C - X_0 + Z_0 \operatorname{tg} \theta - Z_C \operatorname{tg} \varphi) / (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \varphi).$$

Если координаты X_1 и Z_1 лежат в пределах $X_B \leq X_1 \leq X_C$ и $Z_C \leq Z_1 \leq Z_B$, то имеет место преломление лучей на поверхности BC . В этом случае угол отражения $\theta_1 = 2\varphi - \theta$, причем $-\pi/2 < \varphi < 0$.

Угол преломления β определяется из условия

$$\sin \beta = n \sin \alpha,$$

где n — показатель преломления материала купола, а угол падения α связан с углами θ и φ соотношением $\alpha = \pi/2 - \theta + \varphi$.

Если $\sin \beta \geq 1$, то имеет место полное внутреннее отражение и в этом случае $I_1 = I_0$, $I_2 = 0$. Если же $\sin \beta < 1$, то интенсивности отраженного (I_1) и преломленного (I_2) излучения рассчитываются с учетом формулы Френеля. Угол преломления луча относительно оси Z определяется по формуле $\gamma = \pi/2 + \varphi - \beta$.

5. *Отражение и преломление лучей сферической поверхностью AB* (см. рис. 3). Точка пересечения луча с поверхностью AB определяется из решения системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} X^2 + (Z - H_R)^2 &= R^2, \\ X &= X_0 + (Z - Z_0) \operatorname{tg} \theta. \end{aligned} \right\}$$

Это приводит к уравнению второго порядка по X вида

$$ax^2 - bx + c = 0,$$

где $a = 1 + \operatorname{tg}^2 \theta$, $b = 2(H_R - \operatorname{tg} \theta(X_0 - Z_0 \operatorname{tg} \theta))$, $c = (X_0 - Z_0 \operatorname{tg} \theta)^2 - R^2 + H_R^2$.

Учитываем только корни квадратного уравнения, соответствующие условию $Z_A \geq Z_1 \geq Z_B$. Координата X_1 точки пересечения луча с поверхностью купола определяется

как $X_1 = X_0 + (Z_1 - Z_0) \operatorname{tg} \theta$. Если $Z_B \leq Z_1 \leq Z_A$ и $0 \leq X_1 \leq X_B$, то имеет место пересечение луча с поверхностью AB .

Угол α падения луча определяется из следующих соотношений:

1) если $\theta > \delta$, то $\alpha = \delta - \theta$;

2) если $\theta < \delta$, то $\alpha = \theta - \delta$,

где $\operatorname{tg} \delta = X_1 / (Z_1 - H_R)$.

В первом случае угол отражения $\theta_1 = \theta + 2\alpha - \pi$, во втором $\theta_1 = \theta - 2\alpha - \pi$.

Если $\sin \beta \geq 1$, то имеет место полное внутреннее отражение, при этом интенсивность отраженного излучения $I_1 = I_0$, а преломленного — $I_2 = 0$. Если же $\sin \beta < 1$, то интенсивности I_1 и I_2 рассчитываются по формулам Френеля. При этом угол γ определяется из следующих соотношений:

— если $\theta < \delta$, то $\gamma = \delta - \beta$;

— если $\theta > \delta$, то $\gamma = \delta + \beta$.

Предлагаемая математическая модель процесса распространения излучения в корпусе светодиода типа ТО-1 позволяет рассчитать диаграмму направленности и определить угол излучения различных светоизлучающих диодов. С этой целью разработана и апробирована компьютерная программа „DIAGR“ для расчета коэффициента вывода излучения и распределения интенсивности излучения в полярных и декартовых координатах. Результаты моделирования оптических процессов представлены на рис. 4, где приведена экспериментальная (показана точками) диаграмма направленности излучения светодиода КИПД-21К с кристаллом из AlGaAs ($\lambda = 0,66$ мкм), сплошные кривые соответствуют расчетным диаграммам направленности при следующих значениях параметров: 1 — $R_k = 5$ мм, $H_R = 6$ мм, $R = 2,3$ мм, $H_S = 0,3$ мм, $\psi = 45^\circ$, $n = 1,5$; 2 — $H_R = 3,5$ мм, $\psi = 45^\circ$; 3 — $H_R = 3,5$ мм, $\psi = 60^\circ$; 4 — $H_R = 2,5$ мм, $\psi = 60^\circ$; 5 — $H_R = 3,0$ мм, $\psi = 60^\circ$, $n = 1,45$.

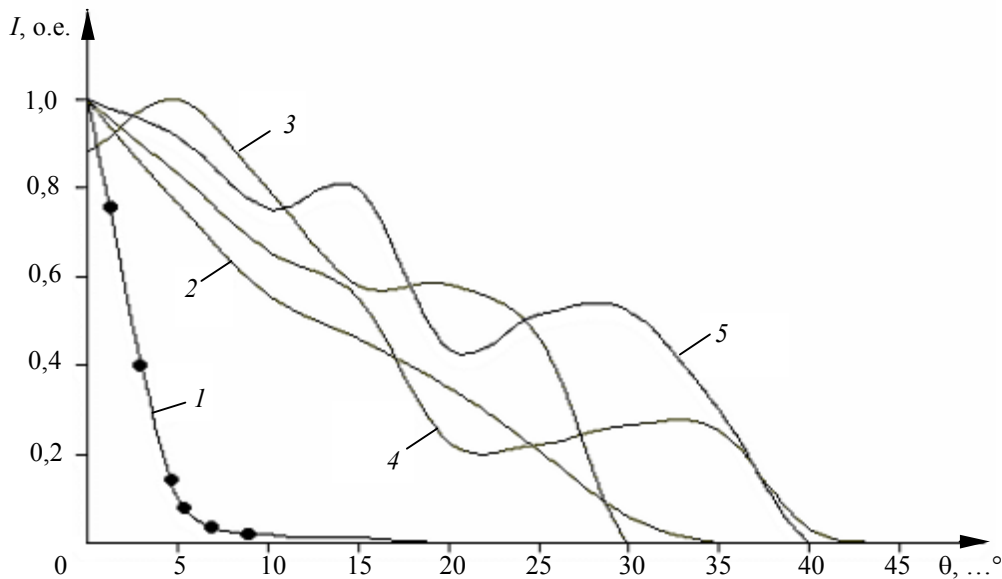


Рис. 4

Измерение углового распределения интенсивности излучения проводилось на гониометре Г-5, в качестве приемника излучения использовался ФЭУ-62. Входное окно приемника ограничивалось диафрагмой с отверстием диаметром 2 мм. Исследуемый светодиод был установлен в центре вращающегося столика, расстояние от центра столика до диафрагмы составило 0,2 м, угол излучения светодиода равен 8° .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коган Л. М. Современное состояние полупроводниковых излучающих диодов // Электронные компоненты. 2000. № 2. С. 22—27.
2. Никифоров С. Г. Проблемы, теория и реальность светодиодов // Компоненты и технологии. 2005. № 5. С. 48—57.
3. Удальцов В. Е., Уварова А. А. Оптические свойства кристаллов для светоизлучающих диодов // Тез. докл. 6-го Междунар. науч. семинара „Карбид кремния и родственные материалы“. Великий Новгород, 2009. С. 102—104.
4. Забелин В. А., Гуревич С. А. Моделирование процессов распространения излучения в светодиодах на основе AlGaInN и методы повышения их эффективности // Тез. докл. 3-й Всерос. конф. „Нитриды галлия, индия и алюминия — структуры и приборы“. СПб, 2004. С. 123—124.

Сведения об авторах

- Виктор Екимович Удальцов** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, кафедра общей и экспериментальной физики; E-mail: veou@list.ru
- Алина Александровна Уварова** — аспирант; Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого, кафедра общей и экспериментальной физики; E-mail: ualek@list.ru

Рекомендована кафедрой
общей и экспериментальной физики

Поступила в редакцию
08.10.09 г.