

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В СВЕТОДИОДАХ

Титова А.А.¹, Удальцов В.Е.¹, Филиппов Д.А.¹

¹ГОУ ВПО «Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого», Великий Новгород, Россия (173003, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, 41), e-mail: ualek@list.ru

Разработана физико-математическая модель светодиода в пластмассовом корпусе. В качестве параметров модели использованы геометрические размеры кристалла и элементов корпуса, показатель преломления и коэффициент поглощения материала корпуса и 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. Адекватность модели проверена путем сравнения расчетных и экспериментальных диаграмм направленности. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований диаграмм направленности светоизлучающих диодов. Проанализировано влияние параметров корпуса на характеристики диаграмм направленности.

Ключевые слова: светодиод, диаграмма направленности, интенсивность излучения.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND MATHEMATICAL MODELLING OF PROCESSES OF DISTRIBUTION OF RADIATION IN LIGHT-EMITTING DIODES

Titova A.A.¹, Oudaltsov V.E.¹, Filippov D.A.¹

¹Yaroslav the Wise Novgorod State University, Novgorod the Great, Russia (173003, Novgorod the Great, Big St. Petersburg street, 41), e-mail: ualek@list.ru

The physical-mathematical model of LEDs in the plastic case. As the parameters of the model used by the geometric dimensions of crystal and shell elements, refractive index and absorption coefficient of the shell and crystal. In addressing the problem of propagation of radiation taken into account the processes of reflection from the base of the shell, cylindrical and spherical surfaces of the dome, the effects of refraction of rays on these surfaces, the absorption of radiation in the crystal and the material of the shell. Adequacy of the model is tested by comparing the calculated and experimental directivity pattern of radiation. The theoretical and experimental results of patterns of light-emitting diodes investigations are presented. The directional characteristics of the pattern versus the case parameters are analyzed.

Key words: light emitting diode, directional pattern, luminous intensity.

Введение

Как известно, эффективность излучения светодиодов определяется в основном двумя факторами: качеством исходной светодиодной структуры и оптическими параметрами корпуса прибора [1; 3]. Свойства светодиодных структур, их внутренний квантовый выход зависят от состава и способов легирования полупроводников, типа контактной системы. Эти параметры оптимизируются на этапах выращивания эпитаксиальных слоев и изготовления кристаллов для светодиодов. Все эти параметры, определяющие качество светодиодных структур, как правило, заранее заданы.

Кристаллы светодиодов, используемые в серийном производстве, в большинстве своем имеют форму параллелепипеда. Индикатриса излучения кристалла, определяющая его диаграмму направленности, близка к диаграмме равномерного источника; отличия от закона Ламберта связаны с эффектами отражения и преломления лучей на границах раздела сред и

влиянием непрозрачного верхнего контакта. Эту зависимость можно оценить теоретически [2] или исследовать экспериментально [3] и учитывать при разработке конструкции прибора.

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

В основу математической модели для расчета диаграммы направленности положены законы геометрической оптики, а именно законы отражения и преломления света, закон поглощения и формулы Френеля для расчета изменения интенсивности при отражении света от диэлектрических поверхностей. Правомерность применения законов геометрической оптики объясняется тем, что параметры корпуса много больше длины волны света, и явления интерференции и дифракции можно не учитывать. Следует заранее отметить, что при распространении света на прозрачных поверхностях корпуса наблюдается явление полного внутреннего отражения. Этот эффект приводит к возникновению дополнительных максимумов на диаграмме направленности.

Модель

Конструкцию типичных корпусов светодиодов можно представить в виде прозрачной конической поверхности, в вершине которой находится полусфера. Такая конструкция является наиболее удобной с точки зрения технологии изготовления. Схематичное изображение типичного светоизлучающего диода приведено на рис. 1. Основными элементами конструкции являются излучающий кристалл (1), установленный на металлическую отражающую поверхность в виде усеченного конуса OFD, называемую фарой (2), и пластмассовый корпус в виде купола ABC (3). Корпус изготавливается в виде цилиндра или конуса высотой H_K , сопряженного со сферической фокусирующей поверхностью AB. 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.

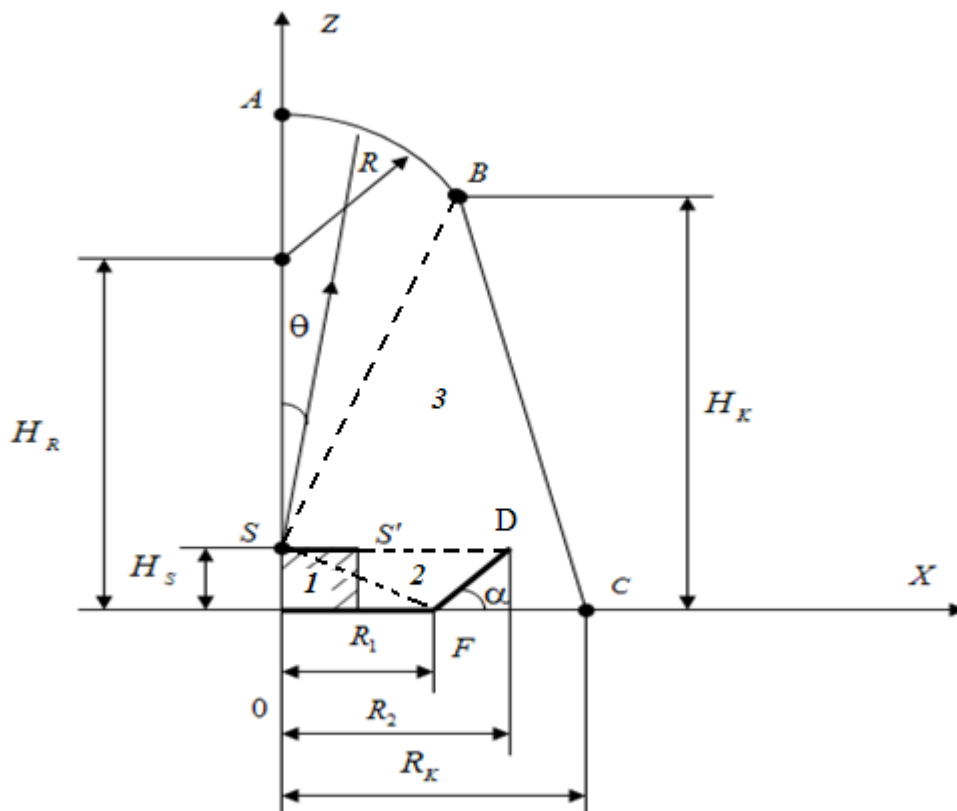


Рисунок 1. Схематичное изображение типичного светоизлучающего диода.

1 - кристалл, 2 - отражатель, 3 – пластмассовая колба, H_s - высота кристалла над фарой, H_R - высота центра окружности верхней части корпуса, R - радиус верхней части сферической поверхности, H_K - высота конической поверхности ($H_K \geq H_R$), R_K - радиус нижнего основания конической поверхности ($R_K \geq R$). R_1 и R_2 - радиусы нижнего и верхнего основания отражателя $R_2 \geq R_1$, α - угол наклона отражателя.

Описание хода лучей в корпусе

При расчете диаграммы направленности 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 $x_s > 0$, и построить диаграмму направленности излучения в первом квадранте выбранной системы отсчета.

В зависимости от угла излучения θ возможны следующие случаи, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Условия отражения и преломления лучей

	Условия для угла	Примечания
--	------------------	------------

	излучения	
1	$\cos \theta > 0, \sin \theta > 0$	Луч направлен вправо и вверх
2	$\cos \theta < 0, \sin \theta > 0$	Луч направлен вправо и вниз
3	$\cos \theta > 0, \sin \theta < 0$	Луч направлен влево и вверх
4	$\cos \theta < 0, \sin \theta < 0$	Луч направлен влево и вниз

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

Численный расчет и эксперимент

Численный расчет диаграммы направленности производился с помощью программы [4], в основу которой была положена методика, предложенная в работе [5]. При расчете в качестве базовых принимались следующие значения параметров корпуса:

$$H_S = 0.35 \text{ мм}, \quad R_K = 1.45 \text{ мм}, \quad H_R = 7 \text{ мм}; \quad R_1 = 0.05 \text{ мм}; \quad R = 2.6 \text{ мм};$$

$$R_1 = 0.3 \text{ мм}; \quad H_K = 8 \text{ мм}; \quad \alpha = 45^\circ.$$

Экспериментальное исследование диаграммы направленности было проведено для светодиодов типа КИПД21Д-К с красным цветом свечения; КИПД21Д-Л - с зеленым цветом свечения и КИПД21Д-Е - с желтым цветом свечения на основе эпитаксиальных структур ЭСАГА 131 (красный), СФАГ 130 (желтый), СФГ 3000 (зеленый).

Результаты численного расчета и экспериментальных измерений для светодиода типа КИПД21Д-Е представлены на рис. 2.

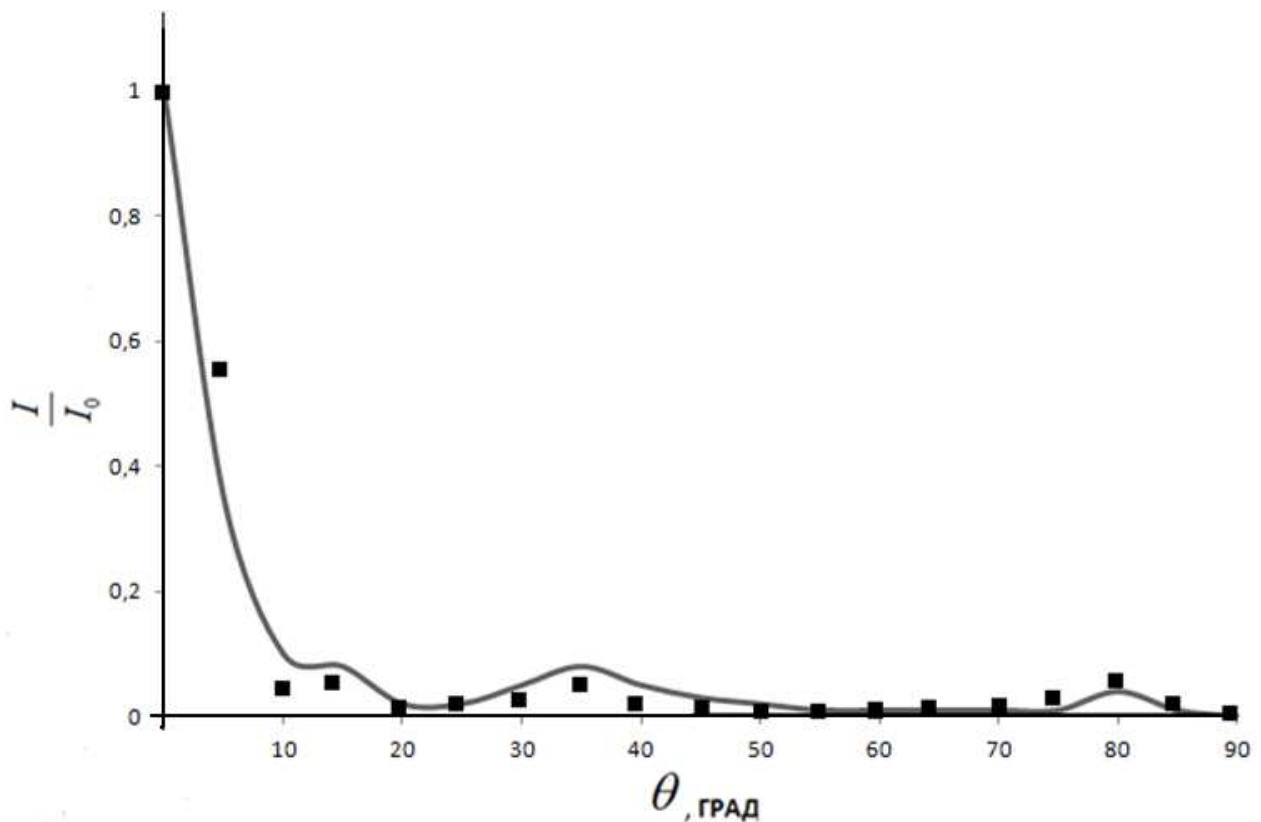


Рисунок 2. Зависимость интенсивности излучения от угла для светодиода типа КИПД21Д-Е. Сплошная линия - численный расчет, точки – эксперимент.

Как следует из рис. 2, наблюдается очень хорошее соответствие результатов численного расчета и экспериментальных измерений, что позволяет сделать вывод о хорошей адекватности модели реальной структуре.

На диаграмме направленности, представленной на рис. 2, хорошо заметны два дополнительных максимума, соответствующие углам примерно 35 и 80 градусов.

Изменяя размеры конструкции светодиода, можно определить, с чем связаны эти дополнительные максимумы, и получить требуемую диаграмму направленности. На рис. 3–5 показаны рассчитанные диаграммы направленности для разных параметров конструкции светодиода.

Все диаграммы имеют два характерных пика интенсивности излучения в районе углов 0° и 40° . Пик интенсивности излучения в районе 0° обусловлен выходом лучей из корпуса без отражения от каких-либо поверхностей. Затем наблюдается спад интенсивности за счет отражения от верхней сферической части корпуса и конической поверхности. После того как угол падения луча на поверхность достигнет угла полного внутреннего отражения, наблюдается минимум, а затем наблюдается второй пик интенсивности за счет выхода преломленных лучей через коническую поверхность. На величину и положение второго пика

существенное влияние оказывают как высота колбы, так и параметры отражателя. Как следует из рис. 3, с уменьшением высоты колбы положение второго максимума смещается в область более малых углов, при этом его величина сначала возрастает, а затем уменьшается. Как следует из рис. 4, с увеличением высоты отражателя положение второго максимума не изменяется, зато заметно изменяется его интенсивность. При уменьшении угла наклона отражателя (рис. 5) положение второго максимума не меняется, зато несколько уменьшается его интенсивность.

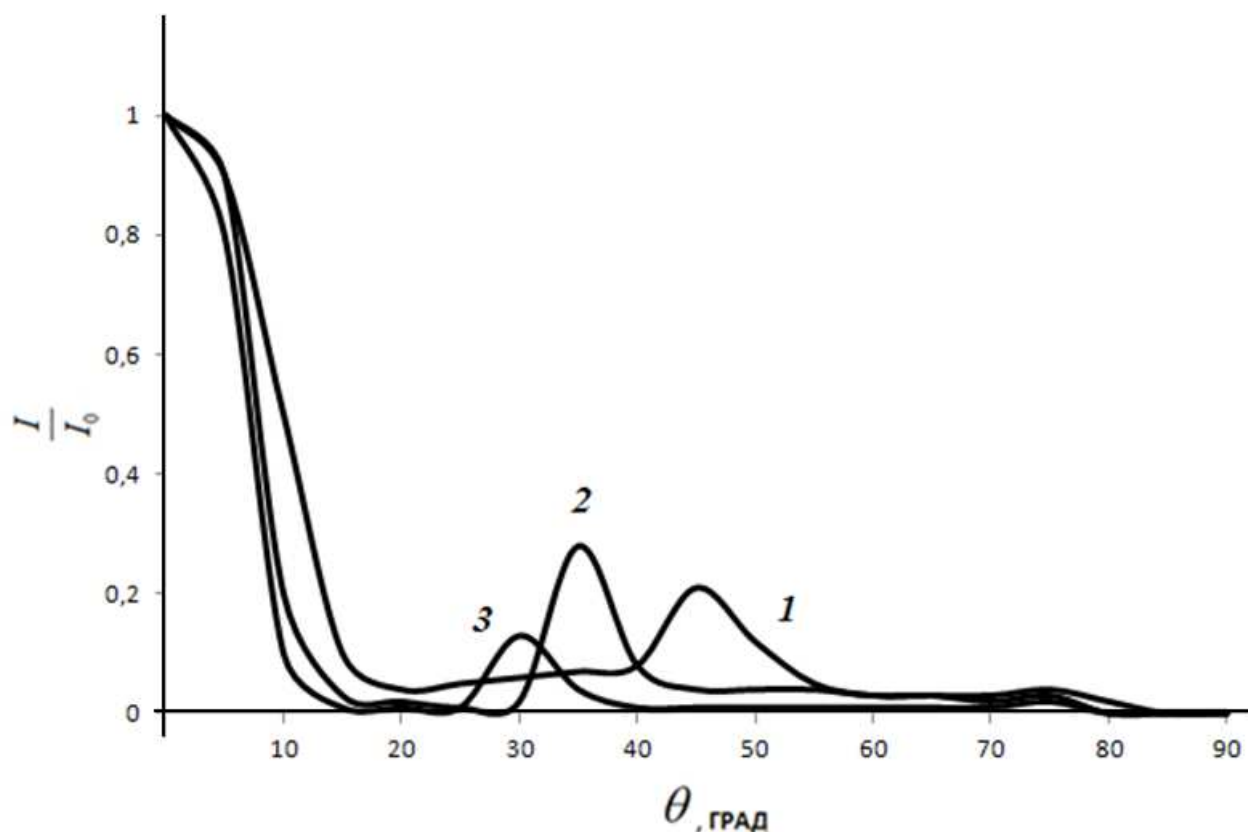


Рисунок 3. Диаграмма направленности для различных размеров колбы светодиода H_K . Длина колбы 1–9, 2–8, 3–7 мм.

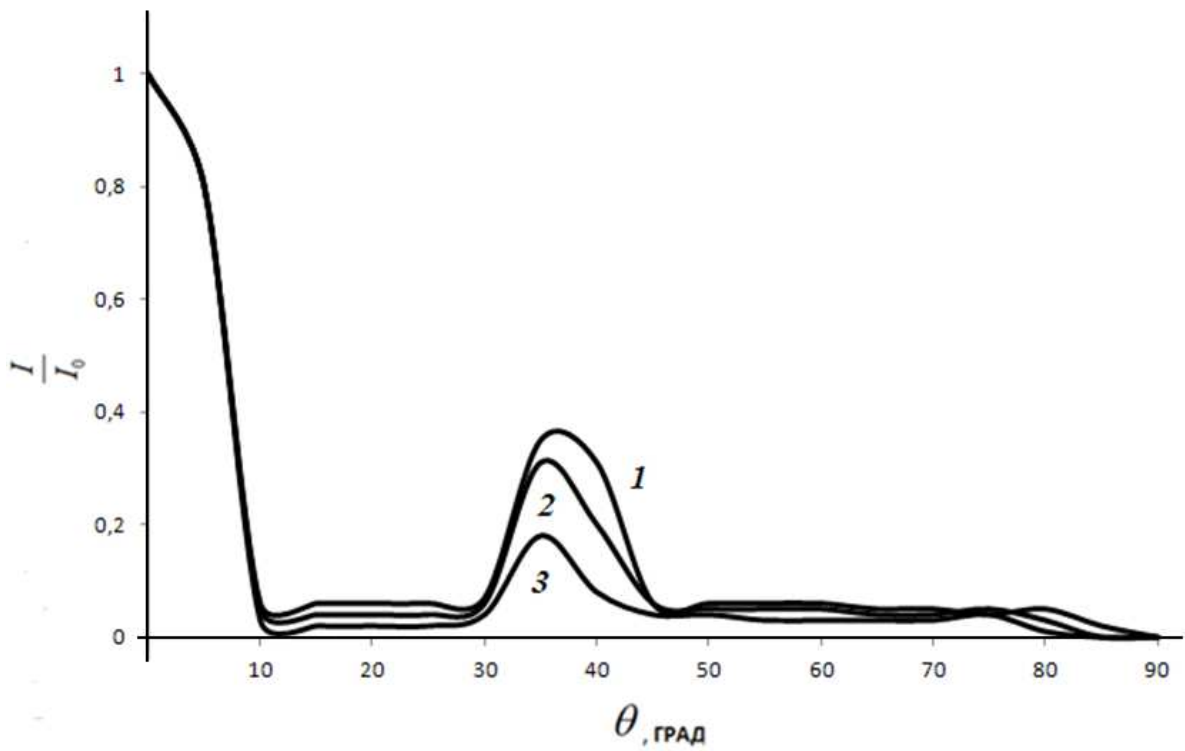


Рисунок 4. Диаграммы направленности для различной высоты отражателя H_S . Высота отражателя 1 – 0.3 мм, 2 – 0.35 мм, 3 – 0.45 мм.

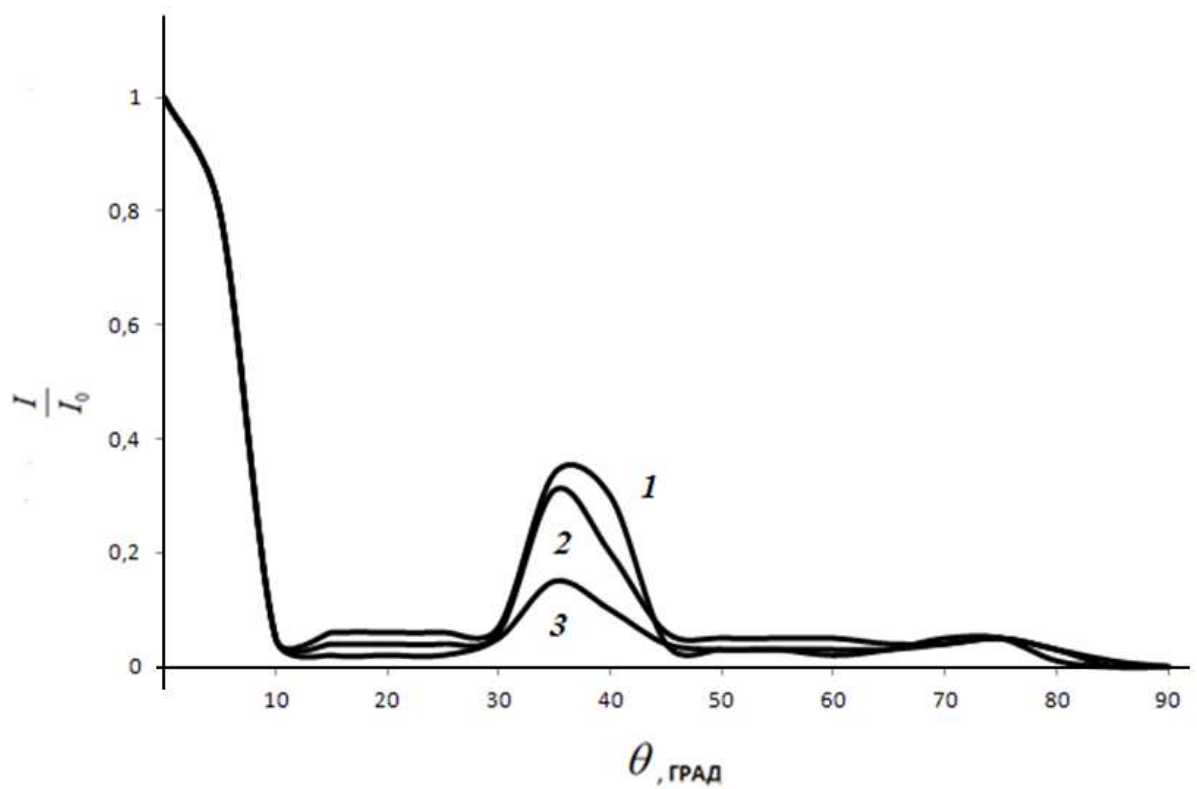


Рисунок 5. Диаграмма направленности для различных углов наклона отражателя α . Угол наклона: 1 – 50°, 2 – 45°, 3 – 40°.

Выводы

При использовании светодиодов в качестве индикаторов необходимо, чтобы диаграмма направленности была плавной, без ярко выраженных дополнительных максимумов и минимумов, которые приводят к тому, что под некоторыми углами свечение индикатора будет не видно. Для этих целей наиболее оптимальными параметрами корпуса светодиода являются следующие значения: высота колбы – 7 мм, высота отражателя – 0.45 мм, угол наклона отражателя – 40 градусов. Данные параметры корпуса позволяют получить диаграмму направленности с минимальным значением интенсивности в побочных максимумах.

Список литературы

1. Забелин В.А., Гуревич С.А. Моделирование процессов распространения излучения в светодиодах на основе AlGaInN и методы повышения их эффективности // Тез. докл. 3-й Всероссийской конф. «Нитриды галлия, индия и алюминия - структуры и приборы». - СПб. - 2004. - С. 123-124.
2. Никифоров С.Г. Проблемы, теория и реальность светодиодов // Компоненты и технологии. - № 5. - 2005. - С. 48-57.
3. Титова А.А., Филиппов Д.А., Удальцов В.Е.; заявитель и правообладатель НовГУ им. Ярослава Мудрого. Расчет диаграмм направленности светоизлучающих диодов в пластмассовом корпусе: Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012618099; заявл. 11.07.2012, опубл. 07.09.2012.
4. Удальцов В.Е., Уварова (Титова) А.А. Моделирование процессов распространения излучения в светодиодах // Известия вузов. Приборостроение. - Вып. 7; 2010. - С. 67-73.
5. Oudaltsov V.E., Uvarova A.A.(Titova) Optical properties of crystals for light-emitting diodes// Abstracts for VI Internathional Seminar on Silicon Carbide and Related Materials .- ISSCRM, 2009. - P. 102-103.

Рецензенты:

Захаров Анатолий Юльевич, доктор физико-математических наук, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород.

Гаврушко Валерий Владимирович, доктор технических наук, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, г. Великий Новгород.