ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.32

СВЕТОДИОДНЫЙ ИСТОЧНИК СВЕТА С ПОВЫШЕННОЙ СВЕТООТДАЧЕЙ

А.Н. Борисов, Р.Р. Шириев

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

dokbore@yandex.ru, shrr@list.ru

Резюме: Представлена оригинальная конструкция светового прибора со светодиодным источником оптического излучения, световыводящий элемент которого, выполнен в виде полуэллипсоида, что позволяет свести к минимуму пассивные потери излучения кристалла и повысить эффективность излучателя. Светильник может найти применение в качестве точечного источника света в оптико-электронном оборудовании, в качестве осветительного прибора, ночного светильника и других видов световых устройств.

Ключевые слова: Светодиод, источник света, повышенная светоотдача, фокальная плоскость, зеркальное покрытие, интерференционное диэлектрическое покрытие, просветляющее покрытие, показатель преломления, коэффициент отражения.

DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-111-119.

Для цитирования: Борисов А.Н., Шириев Р.Р. Светодиодный источник света с повышенной светоотдачей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 111-119. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-111-119.

LED SOURCE OF LIGHT WITH HIGH LIGHT CIRCUIT

A.N. Borisov, R.R. Shiriev

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

dokbore@yandex.ru, shrr@list.ru

Abstract: The original design of a light device with an led source of optical radiation, the light-emitting element of which is made in the form of a half-ellipsoid, is presented, which allows to minimize passive losses of crystal radiation and increase the efficiency of the radiator. The lamp can be used as a point light source in optical and electronic equipment, as a lighting device, night lamp and other types of lighting devices.

Keywords: LED, light source, increased light output, focal plane, mirror coating, interference dielectric coating, anti-reflective coating, refractive index, reflection coefficient.

For citation: A.N. Borisov, R.R. Shiriev. *Led source of light with high light circuit. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2019. vol. 21. № 1-2. pp. 111-119. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-111-119.*

Введение

Световой прибор со светодиодным источником оптического излучения конструктивно представляет собой многокомпонентное полупроводниковое сложное в изготовлении изделие, способное излучать свет.

Основным элементом такого прибора является светоизлучающий диод, который представляет собой полупроводниковое изделие с электронно-дырочным переходом, формирующий излучение в оптической области спектра в процессе протекания через него электрического тока в условно принятом прямом направлении. Диапазон излучения светодиода в основном зависит от химического состава кристаллов полупроводниковой природы, использованных при его создании.

Впервые, в рамках современной истории, о явлении излучения в оптической области спектра твердотельным светоизлучающим диодом стало известно из официального сообщения, сделанного в 1907 году британским ученым и изобретателем по имени Генри Джозеф Раунд. В своей научной работе он описал так называемую электролюминесценцию, которую он обнаружил, ставя эксперименты над карбидом кремния или карборундом SiC, соединенным с металлом, пропуская через него электрический ток. В месте соединения карборунда с металлом возникало свечение, спектр излучения которого зависел от химического состава металла [1] Чуть позже и более основательно это явление было изучено отечественным ученым и изобретателем по имени Олег Владимирович Лосев.

Одним из главных факторов, определяющих эффективность светового прибора, можно считать его светототдачу, то есть интенсивность светового выхода, приходящегося на единицу потребляемой мощности прибора, которая определяется как разница между светототдачей светоизлучающего полупроводникового диода и вынужденными потерями светового потока и электрической энергии в драйвере и проводниках.

Сам по себе, без учета электрических и оптических потерь, белый светодиод сравнительно быстро достиг и даже превзошел по показателю световой отдачи традиционные и зарекомендовавшие себя с хорошей стороны лампы накаливания. К началу двухтысячных годов значение светового выхода белых светодиодов серийного изготовления составляло примерно 20–25 лм/Вт. Для сравнения световая отдача лампы накаливания мощностью до 100 Вт составляла 10–15 лм/Вт, а газоразрядного плазменного люминесцентного источника излучения оптического диапазона, или так называемой люминесцентной лампы, – около 90 лм/Вт.

Одной из проблем при разработке световых приборов на базе светоизлучающих диодов большой мощности является нелинейное снижение светового потока при стремлении увеличить величину удельного тока, приходящегося на единицу площади светодиодного полупроводникового кристалла излучателя. Чуть позднее на базе нового типа полупроводникового светоизлучающего диода из карбида кремния, способного излучать в так называемой коротковолновой синей области спектра, были созданы светодиоды со светототдачей 70 лм/Вт и выше. В 2006 году на суд научной общественности был представлен полупроводниковый светодиод с рекордным на тот момент световым выходом в 130 лм/Вт.

Конструктивные особенности оптической части многих световых приборов и элементы электрического питания способны снизить световой поток и световую отдачу в целом на 50 % и более. Поэтому наряду с развитием полупроводниковых технологий, с

целью повышения энергоэффективности светового прибора, не менее важными является поиск путей оптимизации его оптической части.

Повысить эффективность работы светоизлучающих диодов, то есть максимально использовать излучение полупроводникового кристалла, разработчики пытаются с момента их создания. Как правило, этот источник света схематично можно представить в виде одного и более полупроводникового кристалла-излучателя, закрытого прозрачным пластмассовым световыводящим элементом, выполненным по форме в виде полусферы (рис. 1).

Рис. 1. Схематическое представление светодиодного источника света

Излучатель, как правило, установлен в центре полусферы и технологически склеен в единый излучающий элемент [1]. Исходя из этого представления, главным недостатком такого схематического решения является неполное использование светового потока оптического излучения, испускаемого полупроводниковым кристаллом, который направлен преимущественно в верхнюю полусферу, что несколько ограничивает возможности применения световых приборов на практике. Внесение принципиального изменения в эту классическую оптическую схему светодиодного источника оптического излучения позволит повысить светоотдачу светового прибора не менее чем на 50 %.

Теоретические основы

Попытки повышения эффективности работы светодиодов ведутся в мире постоянно и планомерно. Например, проводятся исследования по совершенствованию геометрии, формы поверхности и показателей преломления непосредственно излучающих кристаллов [2–5]. Это вполне объяснимо, поскольку, материалы кристаллов имеют высокий показатель преломления и, исходя из закона преломления света, открытого в начале XVII века голландским ученым в областях математики, физики и астрономии по имени Виллеброрд Снелл ван Ройен (который, как известно, печатался под псевдонимом Виллеброрд Снеллиус), угол полного внутреннего отражения от вещества, например, с показателем преломления 3,3 будет равен лишь 17° .

Это утверждение имеет место быть благодаря французскому философу, математику, механику, физику Рене Декарту, который использовал результаты многочисленных научных экспериментов Виллеброрда Снеллиуса при написании своего философского трактата «Рассуждение о методе, чтобы хорошо направлять свой разум и отыскивать истину в науках» [2].

Большая часть испускаемого полупроводником светового излучения оказывается локализованной внутри кристалла и вновь поглощается толстой подложкой. Как правило, вернувшиеся в полупроводниковый кристалл электроны не участвуют во вторичной рекомбинации электронно-дырочных пар.

Для уменьшения этих эффектов многочисленными исследователями предложены различные варианты изготовления кристаллов, в частности: использован синтез кристалла на прозрачную подложку, использование кристалла в форме усеченной призмы, использование кристалла конической формы и использование кристаллов со

структурированной поверхностью специальных форм [3–5]. Все предложенные методы совершенствования светоизлучающего кристалла позволяют снизить пассивные потери излучения светодиода, но, по-прежнему, между кристаллом и воздухом остается граница «кристалл»–«световыводящий элемент», который выполнен из материала с низким показателем преломления. Как правило, лучи, выходящие из излучающего элемента, направлены под нормальным углом к пластику или стеклу, не обеспечивая угол полного внутреннего отражения. Поэтому нами предлагается увеличить светоотдачу за счет усовершенствования формы световыводящего элемента. С этой целью нами разработана оригинальная конструкция источника света с оптической системой, имеющей форму поверхности вращения второго порядка с двумя фокальными плоскостями, в одной из которых установлен светодиод в качестве излучателя, а через другую фокальную плоскость выводится полезный световой поток.

В качестве такой поверхности использован полуэллипсоид. Выбор такой формы элемента обусловлен фокальным свойством эллипса [6]. Согласно этому свойству, если источник света поместить в один из фокусов эллипса F_1 , то лучи, отразившиеся от эллипса, соберутся в другом его фокусе F_2 , как изображено на рис. 2.

Рис. 2. Схематическое изображение эллипса

В качестве пояснения фокального свойства эллипса на рисунке показано, что если угол падения света равен углу отражения и от кривой свет отражается так же, как от касательной a , тогда углы 1 и 2 равны, так как касательная a содержит биссектрису угла $F_2 A_1 F$. Углы 2 и 3 равны как вертикальные углы. Следовательно, углы 1 и 3 равны. Поскольку угол падения луча света в точке A равен углу 3, то угол отражения будет равен углу 1, то есть луч света после отражения в точке A пойдет в направлении $A F_2$. Значит если световыводящий модуль сделать эллиптическим и покрыть светоотражающим материалом, то можно максимально эффективно использовать излучение, выходящее от источника. Для этого необходимо в первом фокусе эллипсоида установить излучатель, а второй фокус использовать как осветитель.

Результаты

Разработана оригинальная конструкция светильника с светоизлучающим полупроводниковым диодом в качестве источника света [7], показанная на рис. 3. Цифрами обозначены: 1–световыводящий элемент в форме полуэллипсоида; 2–светодиодный источник света; 3–поверхность рабочая, которую необходимо осветить; 4–зеркальное покрытие снаружи световыводящего полуэллипсоида; f_1 и f_2 –фокальные плоскости полуэллипсоида; S_1 и S_2 –площадки без зеркального покрытия.

Светильник представлен как устройство, содержащее световыводящий элемент в форме полуэллипсоида с отражающим покрытием, например алюминиевым, и излучающий полупроводниковый светодиод. В области фокальных плоскостей f_1 и f_2 имеются площадки S_1 и S_2 , на которые нанесено просветляющее покрытие.

В случае, если эллипсоид изготовлен из оптического стекла, например К-8, ЛК-5, кварца, то на поверхности можно нанести интерференционное покрытие, коэффициент отражения которого близок к единице. В этом случае спектральный состав света, выходящего из светильника, можно менять в зависимости от структуры интерференционного покрытия.

Рис. 3. Схематическое устройство светодиодного светильника

Принцип действия разработанного нами светильника состоит в следующем. Световые лучи, исходящие от светодиода, который установлен в первой фокальной плоскости, достигают поверхности полуэллипсоида и после отражения от нее – плоского основания эллипсоида, а затем, претерпев многократные отражения, за счет основного свойства эллипсоида, соберутся во второй фокальной плоскости, из которой выходят расходящимся пучком, освещая рабочую поверхность.

Предложенный световой прибор способен излучать в любом диапазоне оптической части спектра. Область излучения определяется спектральной областью самого излучающего элемента, т.е. светодиода, пропускающей способностью материала световыводящего элемента и физическими свойствами покрытия, которое нанесено на наружную поверхность устройства. Поэтому нами предлагается дополнительная мера, позволяющая снизить пассивные потери излучения на выходе света из устройства, а именно: нанесение просветляющего покрытия на наружную поверхность световыводящего элемента в области второй фокальной плоскости, формируя так называемое окно.

Принцип действия просветляющих покрытий основан на явлении интерференции, которое было впервые описано в трудах итальянского физика и астронома XVII века Гримальди Франческо Мария [8, 9].

Для этого необходимо выполнение следующих условий. Во-первых, показатель преломления пленки должен быть больше показателя преломления подложки:

$$n_{\text{п}} = \sqrt[2]{n_{\text{пл}}}, \quad (1)$$

где $n_{\text{п}}$, $n_{\text{пл}}$ – показатели преломления подложки и пленки соответственно.

Во-вторых, произведение показателя преломления пленки и толщины пленки равно одной четвертой части длины волны излучения, проходящего через подложку с пленкой:

$$n_{\text{пл}} \cdot d_{\text{пл}} = \frac{\lambda}{4}, \quad (2)$$

где $n_{\text{пл}}$ – показатели преломления пленки; $d_{\text{пл}}$ – толщина пленки; λ – длина волны излучения, проходящего через подложку с пленкой [10].

Исходя из вышеизложенного, опираясь на предыдущий опыт, описанный нами в ранних работах [11], предлагается защитное просветляющее покрытие выполнять из материала, показатель преломления которого меньше показателя преломления материала световыводящего элемента светового прибора.

Такое просветляющее покрытие одновременно может служить защитой поверхности корпуса светодиода от механических повреждений. На рис. 4 показана спектральная характеристика пропускания световыводящего элемента светодиода без покрытия (кривая 1) и с нанесенным на его внешней поверхности защитно-просветляющим покрытием (кривая 2).

Рис. 4. Спектральная характеристика пропускания световыводящего элемента:
1–без покрытия; 2–с защитно-просветляющим покрытием

Обсуждение

Анализ спектральных характеристик (рис. 4) показывает, что диапазон длин волн зоны просветления несколько уже области видимого спектра. В некоторых случаях возникает необходимость расширения области просветления на всю видимую область, а иногда и одновременного просветления в соседних областях спектра. Увеличение оптической толщины одного из слоев двухслойной пленки вызывает появление дополнительных флуктуаций минимумов и ухудшение качества просветления. Для просветления выгоднее пользоваться пленками с низкими показателями преломления. Увеличение числа слоев и общей оптической толщины всего покрытия создает условия увеличения области просветления, то есть его ахроматизации. Вопрос аналитического определения параметров трехслойной пленки весьма сложен. Вместе с тем наблюдаются закономерности, позволяющие создать ряд простых схем трехслойных покрытий, обеспечивающих достаточно эффективное просветление широкой полосы спектра.

Ранее была предложена конструкция просветляющего покрытия [12], в которой суммарная оптическая толщина всех слоев пленки составляет одну длину волны. Коэффициент отражения покрытия не превышает 0,5 % во всей области видимого диапазона спектра, которая показана на рис. 5.

Трехслойную ахроматическую пленку целесообразно также использовать для просветления фотооптики, передающей цветное изображение. Приведенные на рисунке кривые спектрального пропускания показывают широкие возможности просветления, но вместе с тем заставляют более внимательно относиться к выбору того или иного покрытия.

В конечном итоге выбор просветляющего покрытия должен решаться дифференцированно в каждом отдельном случае с учетом оптической схемы, марок оптического стекла или пластика, количества преломляющих поверхностей, подвергаемых просветлению и т. д. Особенно существенными являются условия эксплуатации прибора, спектральные характеристики источников света и чувствительности приемников. Наличие светофильтров, отражателей и других компонент, оказывающих влияние на спектральный состав света, проходящего через систему.

Рис. 5. Спектральные характеристики подложки без покрытия (1); после нанесения однослойного просветляющего покрытия (2); двухслойного покрытия (3) и трехслойного покрытия (4)

Примеров, аналогичных приведенным, можно привести достаточно много. Исследователю и конструктору необходимо учитывать спектральные особенности используемых покрытий. В настоящее время нельзя пользоваться только обычно применяемыми способами расчета потерь света на отражение и характеризовать различные просветляющие покрытия «интегральным» значением коэффициента отражения. Во многих случаях это может привести к неправильному использованию методов просветления и ограничению области эксплуатации прибора.

Экспериментальный образец был изготовлен из органического стекла. В качестве источника света использован светодиод типа АЛ-107. На поверхности светодиода в областях фокальных плоскостей, химическим способом, нанесено однослойное просветляющее покрытие из фторида магния ($n_{\text{П}}=1,38$), оптической толщиной $d_0=0,25$ мкм. Оптическая толщина слоя оптимизирована с целью получения максимального коэффициента пропускания в центре видимой области спектра. Просветление выполнено для светоизлучающего диода белого свечения. Для цветных светодиодов удобнее использовать пленки, с узкими областями просветления. Измерение светового потока показало его значительное увеличение по сравнению с потоком излучения светодиода без эллиптического тела.

Заключение

Таким образом, после теоретического обоснования и экспериментально полученного подтверждения гипотезы был создан принципиально новый световой прибор с улучшенными светотехническими характеристиками посредством оптимизации оптических свойств световыводящего элемента, который может найти эффективное применение в различных светотехнических приложениях, начиная с осветительных приборов, заканчивая оптоэлектронными изделиями и устройствами.

Литература

1. Шуберт Ф. Светодиоды/ Пер.с англ.под ред. А.Э Юновича. 2е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.
2. Храмов Ю.А. Снеллиус Виллеброрд (Snellius, Snell van Royen Villebrord) // Физики: Биографический справочник / под ред. А. И. Ахиезера. Изд. 2-е, испр. и дополн. М.: Наука, 1983. С. 250–400.
3. Гайнутдинов И.С., Азаматов М.Х., Михайлов А.В., Галиев А.Н., Нуруллин И.З., Шушарин С.Н. Гибридное просветляющее покрытие с алмазоподобным слоем // Оптический журнал. 2015. Т. 82, № 1. С.70–73.
4. Schmid W.,Scherer M.,Karnutsch C et and. High-efficiency red and infrared light-emitting diodes using radial outcoupling taper. // IEEE J.Sel.Top. Quantum Electron. 2002. Issue 8. P.256.
5. Hoefler G.E., Vanderwater D.A., DeFever D.C., Kish F.A., Camras M.D., Steranka F.M., Tan I.-H. Wafer bonding of 50-mm diameter GaP to AlGaP-GaP light-emitting diode wafers. // Applied Physics Letters. 1996. Issue 69. P.803.
6. Жузен Салес, Франсеск Баньюлс. Таинственные кривые. Эллипсы, гиперболы и другие математические чудеса /пер. с исп. М.: Де Агостини. 2014. 160 с.
7. Способ изготовления оптического модуля светодиодного светильника: пат. 2580178 Рос. Федерация. / Черных В.Т., Черных Г.С., Борисов А.Н.; № 2014154320/28; заявл. 30.12.2014 ; опубл. 10.04.2016, Бюл. №10.
8. Храмов Ю.А. Гримальди Франческо (Grimaldi Francesco Maria) // Физики: Биографический справочник / под ред. А. И. Ахиезера. изд. 2-е, испр. и дополн. М.: Наука, 1983. С.92–400.
9. Зубов В.П. Физические воззрения Франческо-Мариа Гримальди (1618—1663) // Вопросы истории естествознания и техники. 2008. N 4. С.3–34.
10. Путилин Э.С., Губанова Л.А. Оптические покрытия: учебник. СПб: Лань, 2010. 268 с.
11. Способ изготовления светодиода: пат. 2574424 Рос. Федерация. / Борисов А.Н., Черных В.Т.; № 2014149017/28; заявл. 04.12.2014; опубл. 10.02.2016, Бюл. №4.
12. Козина Д.Н., Салимуллин М.З. Покрытия для повышения светоотдачи светодиодов // Лучшая студенческая статья 2017: сборник статей XI Международного научно-практического конкурса. В 3 ч. Ч. 1. Пенза: МЦНС Наука и Просвещение, 2017. С. 21–27.

Авторы публикации

Борисов Андрей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Шириев Равиль Рафисович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная электроника и светотехника» (ПЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Shubert F. LEDs / Per.with English.under the editorship of A. E. Yunovich. 2nd ed. M.:FIZMATLIT, 2008. 496 p.
2. Khramov Yu. a. Snellius Willebrord (Snellius, Snell van Royen Villebrord) // Physicists: a Biographical reference book / ed. by A. I. Akhiezer. – Ed. 2-e, ISPR. and more. Moscow: Science, 1983. P. 250. 400 p.
3. Gainutdinov I.S. Azamatov M.H., Mikhailov A.V., Galiev A.N., Nurullin I.Z., Shusharin S.N. Hybrid antireflective coating with diamond-like layers // Optical journal. 2015. Vol. 82, No. 1. P.70–73.
4. Schmid W.,Scherer M., Karnutsch et And. High-efficiency red and infrared light-emitting diodes using radial outcoupling paper. // IEEE J. Sel.Top. Quantum Electron. 2002. Issue 8. P 256.

5. Hoefler G.E., Vanderwater D.A., DeFevere D.C., Kish F.A., Camras M.D., Steranka F.M., Tan, I.-H. Wafer bonding of 50-mm diameter GaP to AlGaP-GaP light-emitting diode wafers. // Applied Physics Letters. 1996. Issue 69. P.803.
6. Susan Sales, Francesc Banyuls. Mysterious curves. Ellipses, hyperbolas, and other mathematical miracles /translated from Spanish by M. De Agostini. 2014. 160 p.
7. The method of manufacturing the optical module of the led lamp: Pat. 2580178 Grew. Federation. / Black T. V., Black, G. S., Borisov A. N.; No. 2014154320/28; Appl. 30.12.2014 ; publ. 10.04.2016, Byul. No.10.
8. Khramov Yu. a. Francesco Grimaldi (Grimaldi Francesco Maria) // Physicists: a Biographical reference book / ed. by A. I. Akhiezer. ed. 2-e, ISPR. and more. M.: Science, 1983. P.92–400.
9. Zubov V.P. Physical views of Francesco-Maria Grimaldi (1618-1663) // Questions of history of natural science and technology. 2008. N 4. P.3–34.
10. Putilin E.S., Gubanov L.A. Optical coatings: a textbook. Saint Petersburg: LAN, 2010. 268 p.
11. A method of manufacturing a led: Pat. 2574424 Grew. Federation. / Borisov A.N., Black V.T.; No. 2014149017/28; Appl. 04.12.2014; publ. 10.02.2016, Byul. No. 4.
12. Kozina D.N., Salimullin M.Z. Coatings to improve the light output of LEDs / Best student article 2017: collection of articles XI International scientific and practical competition. 3 p. 1. Penza: ICNS Science and Education. 2017. P.21–27.

Authors of the publication

Borisov Andrey Nikolaevich – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Shiriyev Ravil Rafisovich – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

08 ноября 2018 г.