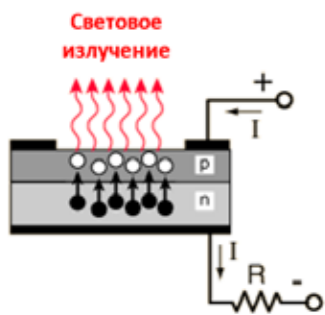




Почему светодиод светит?



При прохождении тока через границу между полупроводниковыми структурами диода происходит генерация фотонов в видимом диапазоне спектра. Однако для начала вспомним, что диод – это простой полупроводниковый прибор, задача которого проводить ток в одном направлении и не пропускать ток в обратном. Это достигается применением полупроводниковых материалов: кремния или германия, в структуру которых вводят дополнительные элементы. Если введен мышьяк – получаем полупроводник N- типа, а если индий – P-типа. Теперь, если эти два полупроводника P- и N- типа соединить вместе, на их стыке образуется PN-переход. Фактически PN-переход – это и есть диод.

Когда через диод течет ток, атомы N-типа отдают свои лишние электроны атомам P-типа, которые их принимают. Когда лишние электроны в материале N-типа проваливаются в отверстия в материале P-типа, они выделяют энергию в виде фотонов. Таким образом, все диоды излучают фотоны! Кстати, этот эффект открыл русский ученый Олег Лосев в 20-х годах прошлого столетия.

Если подобрать состав полупроводниковых материалов так, чтобы длина волны высвобождаемых фотонов попадала в видимую часть спектра, то получим светодиод. Именно за открытия в области голубых оптических диодов в 2014 году японским ученым была присуждена Нобелевская премия.

Правда ли то, что светодиоды выращивают?

Сам светодиод, конечно, не выращивают, а производят по очень сложной технологии, этапы которой мы и рассмотрим.

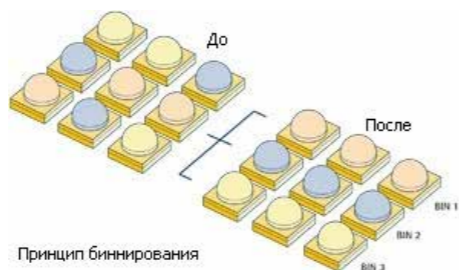
Правда, на первом этапе технологического процесса создания полупроводникового кристалла действительно реализуется процесс выращивания.

На этом этапе проводится выращивание полупроводникового кристалла в реакторе, которое построено на процессе металлоорганической эпитаксии. Так называется ориентированное послойное выращивание кристалла на поверхности подложки путем осаждения из газовой фазы. При этом реализуется термическое разложение металлоорганических соединений, которые содержат в себе все нужные химические элементы. В процессе выращивания кристаллов необходимо тщательно контролировать толщину каждого слоя и однородность структуры. Состав и физические свойства гетероструктуры определяют длину волны излучения светодиодного чипа.

Второй этап – формирование чипа (от англ. chip – «обломок, осколок» – термин, принятый для обозначения интегральных схем), монокристалла или просто части пластины прямоугольной формы. Пластины с выращенными на них гетероструктурами проходят несколько циклов фотолитографии, химического травления, нанесения защитных и буферных слоев и электрических контактов. Затем пластина с чипами разделяется на отдельные чипы с помощью механической или лазерной резки. После этого чипы снова тестируются и сортируются по оптическим и электрическим характеристикам.

Что такое бинирование чипа светодиода?

Бинированием чипа называется третий этап технологии производства светодиодов на котором происходит сортировка чипов.



Принцип бинирования

Выращенные чипы светодиодов обычно похожи, но редко идентичны. Как яблоки с одного дерева – все одного сорта, но нет двух абсолютно одинаковых.

А для того, чтобы было возможно использовать чипы в дальнейшем массовом производстве (бин приходится сортировать по группам – бинировать (Бин – набор диапазонов значений, которому удовлетворяют входящие в него элементы (англ. bin – «ящик, ларь»)). Внутри одного бина определенные параметры светодиодного чипа находятся в допустимых пределах, прежде всего это: рабочее напряжение, осевая сила света или оптическая мощность, пиковая или доминантная длина волны излучения.

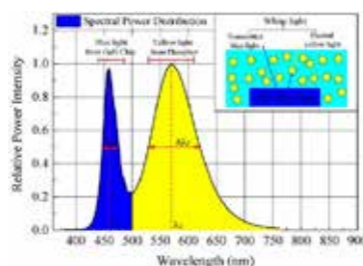
Что такое корпусирование светодиода?

Корпусирование светодиода – это заключительная сборка компонентов в единое изделие. Чип нужно поместить в корпус, подсоединить электрические контакты и нанести на каждый чип люминофор и, при необходимости, установить первичную линзу.

Основное назначение корпуса светодиода – обеспечить электрическое соединение, отвести тепло от чипа к радиатору, создать определенную диаграмму направленности излучения и защитить светодиодный чип и соединения от внешней механической нагрузки. Обычно корпус изготавливают из пластмассы или керамики, иногда из металла.

После процесса корпусирования – светодиод готов к применению.

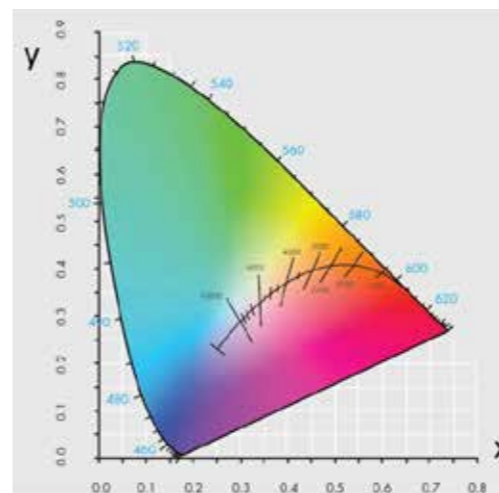
Зачем светодиоду нужен еще люминофор?



Люминофор – это вещество, обладающее люминесценцией, то есть способностью преобразовывать поглощаемую им энергию в световое излучение. В производстве светодиодов люминофор применяют в виде порошка в составе полимерного компаунда, покрывающего чип или путем размещения частиц люминофора в оптическом материале (оптическом полимере, пластике). Поглотив энергию от коротковолнового излучения чипов (например, синего цвета), люминофор переизлучает ее в длинноволновой области спектра (например, желтой или красной). Однако синий свет чипа поглощается в люминофоре не полностью и после смешения с желтым светом люминофора становится белым или почти белым.

Максимум эффективности от светодиода с люминофором можно получить в случае, если пиковая длина волны излучения чипа совпадет с длиной волны максимума поглощения люминофора. В том случае, если координаты цветности чипа и люминофора пересекают область белого света на диаграмме цветности, подобранная должным образом концентрация люминофора позволяет изготовить источник белого света.

Что такое белый свет и как измерить его оттенки?



Международная комиссия по освещению МКО (CIE) разработала цветовое пространство XYZ в 1931 году, связав полную гамму видимых цветов с тем, как эти цвета математически сочетаются друг с другом. Цветовое пространство МКО имеет 2 измерения (x,y). С внешней стороны цветового пространства – насыщенные цвета, ближе к середине – пастельная область, а в центре – белое пространство. Изогнутая линия посередине – это область цветности, которая представляет цветность спектра излучения абсолютно черного тела (АЧТ) с различной температурой.

Именно вокруг этой линии расположено пространство белого цвета, имеющего различные спектры и цветность в зависимости от температуры АЧТ: теплый оттенок для низкой, нейтральный – для промежуточной и холодный – для высокой. Именно температура черного тела стала метрикой цветности белого цвета. Координаты цветности спектра излучения белого цвета сопоставляют с ближайшей точкой на локусе АЧТ и присваивают это значение - коррелированной цветовой температуры (КЦТ) в градусах Кельвина для идентификации цветности.

Вот почему измерять оттенки белого можно в градусах Кельвина. Непривычно, конечно, но удобно. Правда, из этого возникает неопределенность – белый цвет с немного отличными оттенками может иметь одинаковую КЦТ!

Что такое бинирование светодиода?

Даже незначительные отклонения в процессе производства светодиодов приводят к неизбежному разбросу их рабочих характеристик: светового потока, цветовой температуры и по напряжению. Технология, которую производители используют для проверки схожести светодиодов и их сортировки по группам, называется бинингом светодиодов. Для светодиодов белого света параметрами бининга служат рабочее напряжение, осевая сила света и координаты цветности. При осуществлении бининга для каждой группы схожих светодиодов обычно указывается максимальное (max) и минимальное (min) значения характеристик. Таким образом, задаются границы диапазона. В большинстве случаев указывается среднее (average) или типичное (typical) значение характеристики.

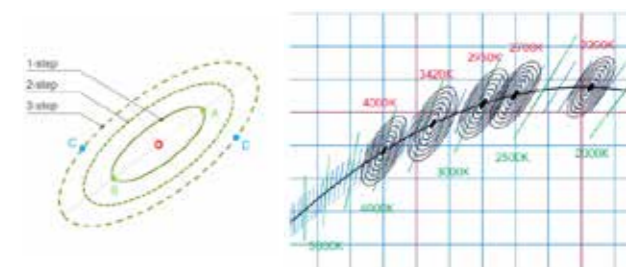
Бинирование светодиодов по падению напряжения (forward voltage drop). В ряде случаев разброс значений падения напряжения может составлять серьезные значения, например, между 2,8 и 3,8 В. Проблема решается сортировкой светодиодов по бинам в диапазоне разброса не более 5%.

Table with columns: Forward Voltage, Bin Code, Min., Max. and Unit: V @20mA. Rows include bin codes D7 through D11 with their respective voltage ranges.

Бинирование светодиодов по световому потоку (luminous flux). Светодиоды сортируются на выбранном эталонном токе, например, 350 мА. Значения светового потока для других значений тока определяются относительно эталонного и указываются в %.

Table titled 'Philips Lumileds Luxeon Rebel' showing Bin, 350mA 100%, 700mA 175%, and 1000mA 225% values for bins H through S.

Бинирование светодиодов по цветности – наиболее значимая категория сортировки. Основная задача сортировки по цветности – обеспечить группы светодиодов в категории с разбросом цветности, неразличимым человеческим глазом. Для количественного измерения разброса цветности используют значение стандартного отклонения соответствия цветов (SDCM – Standard Deviation Color Matching). SDCM имеет то же значение, что и эллипс МакАдама. Одношаговый эллипс МакАдама определяет зону на цветовом пространстве МКО 2 CIE 1931, в пределах которой человеческий глаз не может различить цветовую разницу. В пределах 4-шаговых концентрических эллипсов разница в цветах или не заметна, или едва заметна. В пределах 4-шаговых концентрических эллипсов разница в цвете всегда заметна. На графике показаны концентрические эллипсы МакАдама, отличающиеся на один шаг для белых светодиодов пяти различных КЦТ.



Если мы рассмотрим размер одноступенчатого эллипса SDCM при цветовой температуре 3000 К, диапазон CCT составляет ± 30 К, а соответствующий диапазон u'v' (координаты цветности в унифицированном цветовом пространстве МКО 1976 г.) составляет ± 0,001. Другими словами, если мы рассмотрим два светодиода с разницей КЦТ более 60 К, есть вероятность, что мы увидим разницу в цвете.

Как используют информацию о бинировании светодиодов при производстве светильников?

При серийном производстве светодиодных светильников необходимо обеспечить стабильность их световых и цветных параметров внутри партии или от партии к партии. Сделать это можно, только тщательно контролируя характеристики светодиодов, устанавливаемых в светильник, а именно постоянство выбранных оптимальных бинов или композиций бинов. Контроль бинирования светодиодов по напряжению обеспечит стабильность работы электронных блоков питания, постоянство и равномерность светотехнических характеристик светильников.

Знания данных параметров позволяет эффективно работать с различными поставщиками, существенно оптимизировать складские запасы и минимизировать себестоимость выпускаемых изделий.





Какие параметры следует считать достаточными для грамотного сравнения и выбора светодиодных светильников?

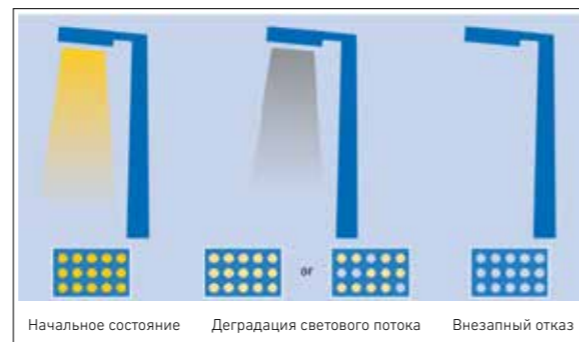
Для обоснованного сравнения светильников следует принимать в расчет следующие параметры, указанные в сопроводительной документации:

- Номинальная потребляемая мощность Р, Вт. Измеренная мощность светодиодного светильника не должна превышать заявленную номинальную мощность более чем на 10 процентов при работе от номинального напряжения, при номинальной температуре окружающей среды и номинальном световом потоке после термостабилизации.
- Номинальный световой поток, Ф, лм. Измеренные начальные значения светового потока светильников должны быть не более чем на 10 процентов ниже опубликованного номинального светового потока. Если не указано иное, значение светового потока светодиодного светильника указано при температуре окружающей среды равной 25 °С.
- Световая отдача, η, лм/Вт. Световая отдача светодиодного светильника – это отношение излучаемого светового потока и мощности, потребляемой светильником, в люменах на ватт. (Чтобы оценить энергоэффективность светильника, обычно недостаточно учитывать только световую отдачу. При расчете параметра световая отдача учитывает рассеянный и паразитный свет, который не влияет на освещение целевой зоны).
- Распределение силы света. Распределение силы света определяется при испытаниях на гониофотометре и вносится в техническую документацию. Пространственное распределение силы света светильника показывается кривыми распределения силы света (КСС). Значения выражаются в кд (кандела) или в кд/кلم (кандела на килолюмен).
- Цветовые характеристики: коррелированная цветовая температура (КЦТ), индексы цветопередачи, допустимые отклонения цвета.
 - Коррелированная цветовая температура указана в технических характеристиках источников света и выражена в градусах Кельвина (К). Ее значение рекомендуется округлять до 100 К. Следует отметить, что разные источники света могут давать свет разного цвета, даже если они имеют одинаковую коррелированную цветовую температуру!
 - Источники света могут иметь разные характеристики цветопередачи из-за различного спектрального состава. Общий индекс цветопередачи Ra показывает, насколько близко воспринимаемый цвет объекта соответствует его внешнему виду под эталонным источником света.
 - Допустимые отклонения цвета, выраженные в эллипсах (шагах) МакАдама. Во многих случаях классификация допустимых отклонений по ГОСТ 54350 оказывается слишком грубой. На основе исследований Д. МакАдама была разработана система эллипсов, расположенных на цветовом пространстве МКО, которая позволяет более точно описывать цветовые отклонения. Эллипсы МакАдама, содержат внутри цвета, которые человеческий глаз не может отличить от цвета в центре эллипса. Эти 2-, 3-, или 5-шаговые эллипсы МакАдама используются для характеристики цветовых различий двух источников света.
- Пульсации светового потока. Светильники с пульсирующим световым потоком могут вызывать физиологические проблемы, кроме этого стробоскопические эффекты также могут привести к опасностям.
- Номинальная температура окружающей среды. Номинальная температура окружающей среды t_a – это максимальная температура, при которой светильник может работать в нормальных рабочих условиях. Если $t_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$, то

она не указывается специально. Номинальная температура должна быть указана в документации и на шильдике светильника, если она отличается от 25 °С.

- Критерии долговечности светодиодных светильников. Срок службы светодиодных светильников определяется не только моментом внезапного отказа. До определенного количества часов работы большинство светильников вообще не выходят из строя, однако их световой поток со временем уменьшается (деградирует). Помимо ухудшения характеристик светодиодов, уменьшение или ухудшение светового потока может быть связано с выходом из строя отдельных светодиодов или светодиодных модулей, которые могут быть встроены в светильник в большом количестве.

Кроме этого, внезапный отказ может произойти и в электронном блоке светильника.



Что означают дополнительные обозначения LxVy при декларировании срока службы светильника?

- **Номинальный срок службы** светодиодного светильника выражается в часах (час) или тысячах часов (тыс. час). Отличительной особенностью является то, что в случае светодиодных светильников данная характеристика относится к большим совокупностям светильников и имеет вероятностный характер. При этом этот параметр называют полезным сроком службы и обозначают LxVy.
- **Полезный срок службы LxVy** – Время, в течение которого совокупность светодиодных светильников обеспечивает не менее – X заявленного процента светового потока, а этому условию могут не соответствовать не более – Y заявленного процента от общего количества светильников. Например, L70B10 = 30 тыс. час. Если рассмотреть величину полезного срока службы при значении Vy при Y = 50%, то эта характеристика получила название средний (или медианный) полезный срок службы. Статистически среднее значение B50 представляет с достаточной степенью точности снижение светового потока для группы светодиодных светильников в течение прогнозируемого срока службы.
- **Средний (или медианный) полезный срок службы** обозначается Lx, например, L70 = 50 тыс. час.

А как учитывается в характеристиках вероятность внезапного отказа светодиодного светильника?

В подавляющем большинстве случаев внезапный отказ происходит из-за проблем в электронном конвертере или иных электронных блоках светильника. Вероятность внезапного отказа обозначается символом Су, в котором у – ожидаемая интенсивность отказов или процент внезапно отказавших светильников при среднем (медианном) сроке службы. Например, C10 = 50 тыс. час означает, что ожидаемая интенсивность отказов равна 10%.

Как подтверждают соответствие светодиодных светильников стандартам LM 80, LM 70, LM 79, TM 21?

Секундочку, в этих стандартах описаны методики измерений! В них нет требований к параметрам светильников!

Светильник не может им соответствовать, как арбуз не может соответствовать способу измерения его веса продавцом.

- **Стандарт LM 80** был разработан Обществом инженеров освещения Северной Америки (IESNA), чтобы дать возможность оценивать и сравнивать световые характеристики светодиодных компонентов различных компаний. Обычно это 6000-часовой тест (может быть 10 тыс. часов), который показывает деградацию светового потока и изменение цветности за период при определенных рабочих температурах 55°, 85° и температуре, определенной третьим производителем, скажем, 105°.
- **Стандарт LM 79** – одобренный (IESNA) метод электрических и фотометрических измерений светодиодных светильников. Отчет об испытании включает следующие характеристики:
 - Общий световой поток (световой поток);
 - Пространственное распределение силы света;
 - Характеристики электрической мощности (мощность напряжение);
 - Световую отдачу (расчет);
 - Цветовые характеристики (Индекс цветопередачи, КЦТ);

- **Стандарт TM 21** – одобренный (IESNA) метод сбора данных LM-80 и составления прогнозов полезного срока службы светодиодов. Стандарты применяются только к проекции срока службы SMD светодиода, матрицы или модуля. Затем результаты можно использовать для интерполяции срока службы LED-источника в системе (светильник или лампа) с учетом температуры корпуса изделия.

Этот метод позволяет определить прогнозируемый срок службы светодиодного источника или светильника. Результаты представляются в следующем виде продолжительности периода данных LM-80 в тыс. час. Например, L70 (6k) = 36000 часов.

Стандарт L70 – IESNA ввела рекомендации относительно подходящего времени для замены светодиодных источников света. Было установлено, что человек не может точно воспринимать изменение уровня освещенности, пока оно не достигнет 30% от начального. Таким образом, 70% исходной светоотдачи было определено как рекомендуемое время для замены светодиодного источника света.

Почему говорят, что стандартные методы оценки индекса цветопередачи (CRI) устарели и работают неправильно при измерениях светодиодных источников?

Многие десятилетия индекс цветопередачи использовался для оценки точности, с которой источник света может отображать различные цвета объекта. Стандартная система CRI основана на восьми тестовых цветах, распределенных по всему спектру и надежно работает для сплошных спектров. Чем выше значение CRI источника света, тем точнее цвет данного объекта.

Однако когда мы работаем со сложными спектрами светодиодов, возникают существенные проблемы. Полученный в результате расчетов высокий индекс может не соответствовать нашим ожиданиям от качества цветопередачи. Для решения проблемы были предложены дополнительные тестовые цвета, например, R-9 для оценки красных тонов. Затем появилась шкала качества цвета CQS – система, в которой используется более широкая палитра из 15 эталонных цветов.

Сегодня, в игру вступает новая Методика оценки качества цветопередачи TM-30-15.

Она заключается в сравнении цвета объекта под тестовым источником с цветом объекта под эталонным источником света в зависимости от КЦТ и включает определение трех основных компонентов:

1. Rf – индекс точности (Fidelity index), аналогичный обычно используемому CRI, но определяемый по 99 образцам.
2. Rg – индекс гаммы (Gamut Index), который предоставляет информацию о насыщенности цвета.
3. Цветная векторная графика – графическое представление оттенка и насыщенности относительно эталонного источника.

Сегодня все методики легитимны. Победит ли TM-30 окончательно или CRI найдет способ сохранить актуальность – скоро узнаем.

