

Температура в жизни и работе светодиодов

Часть 1

Сергей НИКИФОРОВ
nikiforov@screens.ru

Статья посвящена исследованиям зависимостей параметров светоизлучающих диодов от температуры окружающей среды. Обсуждается поведение подавляющего большинства электрических, энергетических и колориметрических характеристик, зависящих от температуры и составляющих всю систему параметров светодиодов, разъяснен их физический смысл и природа возникновения, а также прослежена связь между характеристиками. Приведены практические примеры влияния изменения параметров излучения у светодиодов на его восприятие глазом человека. Предложены некоторые методы компенсации уходов указанных характеристик.

1. Природа различных температурных условий работы светодиодов и физические основы причин возникновения изменений их параметров с температурой

Не останавливающийся ни на минуту прогресс в области совершенствования полупроводниковых источников света необратимо завоевывает все новые области применения светодиодов и, соответственно, требует от них гораздо большего. Это обстоятельство подталкивает разработчиков на нетрадиционные решения проблем удовлетворения возросших требований. А для этого необходимо постоянно углублять знания в области физики работы светоизлучающих диодов.

Возвращаясь к проблеме продолжительности работы и стабильности параметров светодиодов, стоит обсудить еще одну очень важную сторону этой темы — влияние температуры на характеристики излучения. В большинстве случаев, когда светодиоды участвуют в формировании ответственных сигналов, определенных стандартами, или являются исполнительной частью системы передачи изображения, температурным зависимостям всегда есть место при расчетах и проектировании систем, а также при поиске методов компенсации уходов параметров. Важно отметить, что под влиянием температуры изменяются практически все фундаментальные характеристики светодиодов, указываемые в спецификациях производителем только при комнатных температурах и составляющие основу для указанного проектирования, в то время как устройства на этих светодиодах, как правило, работают в широком диапазоне температур. Знание характера изменения харак-

теристик в зависимости от тепловых условий позволит учесть и скорректировать выходные данные указанных устройств на их основе.

Причины возникновения проблемы влияния температуры на параметры излучения светодиодов в несколько неравных пропорциях разделяется на 2 части — внешние и внутренние факторы изменения тепловых условий функционирования излучающего кристалла. Работа светодиода связана с протеканием электрического тока через р-п-переход кристалла и рекомбинацией носителей зарядов. Неоднократно упоминавшееся в публикациях значение КПД светодиода [1], каким бы оно ни было, не может обеспечить работу гетероструктуры без выделения тепла. Причем, в среднестатистическом светодиоде подавляющее большинство потребленной энергии идет именно на нагрев (КПД составляет 12–16%). Поэтому всегда, какой бы ни была температура окружающей среды, существует влияние собственного нагрева кристалла, кристаллодержателя и других частей конструкции на весь комплекс параметров светодиода. Оно, безусловно, непрерывно накладывается на внешние факторы изменения температуры, и прямо пропорционально зависит от динамики потребления электрической мощности светодиодом. В итоге получается очень сложная температурная характеристика работающего светодиода, учитывающая и сочетающая все перечисленные факторы. Ввиду сложности учета всех компонентов этой характеристики проще сопоставить итоги экспериментов по определению уходов параметров с физическими основами работы полупроводникового излучателя, результатом чего могут стать зависимости параметров вполне реальных светодиодов от температуры.

Поскольку основой светодиода является излучающий кристалл, стоит упомянуть о некоторых температурных особенностях его работы.

Не углубляясь в тонкости процессов, происходящих в области пространственного заряда излучающей гетероструктуры, состоящей из твердых растворов материалов группы A^mB^v , можно сказать, что основным элементом сформированного р-п-перехода является запрещенная зона, где происходит рекомбинация носителей зарядов. Представляя из себя энергетический барьер для зарядов, который они должны преодолеть для того, чтобы рекомбинировать с носителем противоположного знака, запрещенная зона с ее характеристиками определяет параметры этой рекомбинации, таким образом формируя характеристики результатов актов рекомбинации — оптического и теплового излучений. Поэтому температурные зависимости ширины запрещенной зоны будут вносить подавляющий по значимости вклад в изменения колориметрических (спектральный состав), энергетических и других параметров производимого структурой излучения и электрических (прямое напряжение U_f) характеристик светодиода. Формула (1) показывает пропорциональность функции $I(h\nu)$ (спектрального состава воспроизводимого структурой излучения) ширине запрещенной зоны E_g и плотности состояния заполнения в зоне проводимости и свободных состояний в валентной зоне в соответствии с законом распределения Ферми — Дирака для электронов и дырок; $h\nu$ — энергия фотона.

$$I(h\nu) \sim (h\nu - E_g)^{1/2} \exp[-(h\nu - E_g)/kT] \quad (1)$$

Изменение ширины запрещенной зоны с изменением температуры связано с двумя

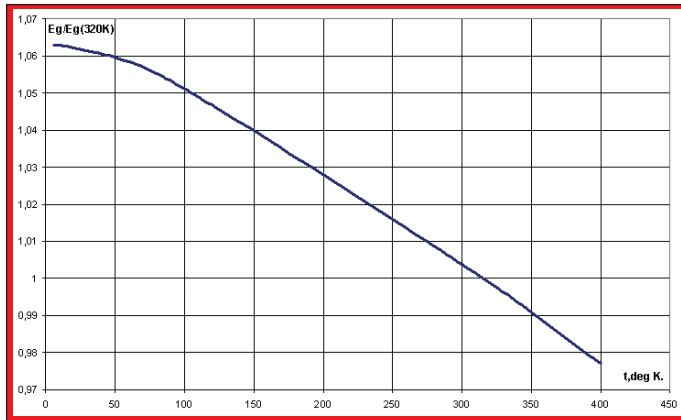


Рис. 1. Тенденция изменения ширины запрещенной зоны большинства полупроводников группы A³B⁵ в зависимости от температуры



Рис. 2. Приближительная общая зависимость квантовой эффективности излучения гетероструктур материалов группы A³B⁵

эффектами: термическим расширением кристаллической решетки кристалла и рекомбинацией с участием кванта теплового излучения — фонона. Влияние термического расширения решетки обеспечивает примерно 25% наблюдаемой температурной зависимости. Теоретический расчет вклада, даваемого этим эффектом, показывает, что ширина запрещенной зоны при высоких температурах меняется линейно с температурой. У большинства полупроводников значение E_g уменьшается с ростом температуры (рис. 1).

Большой вклад в квантовую (энергетическую) эффективность излучения будет вносить и носящая конкурирующий характер, безизлучательная рекомбинация, зависящая от температуры приблизительно так, как показано на рис. 2. Квантовая эффективность определяется как отношение числа возбужденных носителей, дающих вклад в излучение, к полному числу носителей, участвующих в рекомбинации, и может быть выражена формулой:

$$\eta_q = R_r / R \quad (2)$$

где R_r и R — скорости излучательной и полной рекомбинации.

Другими словами, внутренний квантовый выход излучения η_q — число излучаемых фотонов на одну электронно-дырочную пару. В гетероструктурах величина η_q теоретически может быть близка к 100%. Для практики, однако, важнее внешний квантовый выход излучения η_e — отношение числа излучаемых во внешнюю среду квантов света к числу электронно-дырочных пар, пересекающих p - n -переход. Он характеризует преобразование электрической энергии в световую и, помимо внутреннего квантового выхода (η_q), учитывает коэффициент инжекции пар в активную область (γ) и коэффициент вывода света во внешнюю среду η_o (формула 3).

$$\eta_e = \gamma \eta_q \eta_o \quad (3)$$

Данные зависимости выведены для идеализированных структур. Безусловно, на прак-

тике влияние внешних факторов гораздо больше и носит более выраженный характер из-за наличия дефектов, неизбежно возникающих при эпитаксии (выращивании кристаллов) в виде неравномерности распределения легирующих примесей и при монтаже кристаллов (контактные явления). Как правило, подобные эффекты накладываются друг на друга и лишь усугубляют результат изменения температуры.

2. Температурные зависимости параметров светодиодов

Электрические характеристики

Столь обширное влияние температуры на подавляющее число характеристик светодиодов, которые взаимосвязаны, стоит разделить на группы по природе возникновения и результату воздействия — приблизительно так, как формируются спецификации на светодиоды.

Первой группой параметров являются электрические: зависимости прямого напряжения U_f светодиода от температуры T_a при неизменном токе I_f . Здесь же рассмотрим и изменение потребляемой энергии P_{dis} , которая также является функцией температуры.

Эти параметры будут зависеть в основном от характера изменения ширины запрещенной зоны p - n -перехода. Здесь и далее целесообразно рассматривать диапазон температур окружающей среды, внутри которого сохраняется работоспособность светодиода и верны приведенные значения величин. Как правило, этот диапазон не бывает менее -60 и более $+60$ °C. Подобные температуры характерны и для рабочего диапазона, установленного для различных узлов электронной аппаратуры, выполняющих функцию управления режимом светодиодов.

Представляя прямое напряжение U_f светодиода как функцию от температуры $U_f(T_a)$ (рис. 4–8), необходимо иметь один фиксированный параметр, относительно которого изменяется напряжение, поэтому здесь речь пойдет о некотором семействе зависимостей

$U_f(T_a)$ при различных прямых токах I_f . Отличия в поведении кривых этого семейства будут состоять в основном в различных степенях теплового действия этого тока и различной степени охлаждающей способности кристаллодержателя (конструкции светодиода), которая не линейна по отношению к изменениям температуры и I_f . Однако на низких температурах это сказывается мало: более влиятельным фактором оказывается внешняя низкая температура, а перегрев кристалла относительно нее (T_a) становится менее заметным и не приводит к существенной разнице в поведении кривой $U_f(T_a)$, несмотря на увеличивающуюся потребляемую электрическую мощность (график на рис. 10). Это можно объяснить значительным увеличением внешнего квантового выхода (рис. 2) при этих температурах, что приводит к уменьшению выделения тепла при рекомбинации. В то же время, на высоких температурах увеличение температуры T_a приводит к цепной реакции: снижается η_q (рис. 2), уменьшение U_f не приводит к пропорциональному уменьшению P_{dis} , охлаждающая способность кристаллодержателя (конструкции светодиода), значительно снижается из-за малой разницы внешней и внутренней температур, исчерпывая в пределе лимит теплоемкости, в результате, с дальнейшим ростом температуры градиент напряжения уменьшается, стремясь к минимуму и являясь следствием уравниваемости динамики внутреннего и внешнего нагрева.

Ввиду существенной разницы во многих показателях у кристаллов с различными размерами запрещенных зон, материалами состава структуры и подложки для каждой группы светодиодов будут не только свои зависимости $U_f(T_a)$, но и функции других величин, поэтому удобно условно разделить это многообразие на четыре группы по цвету излучения и составу структуры: InGaN/AlGaIn/GaN — синие и зеленые, AlInGaP/GaP — красные и желтые; отдельную группу составят светодиоды на основе GaAs с доминирующей длиной волны 642 нм. Для обсуждения зависимо-

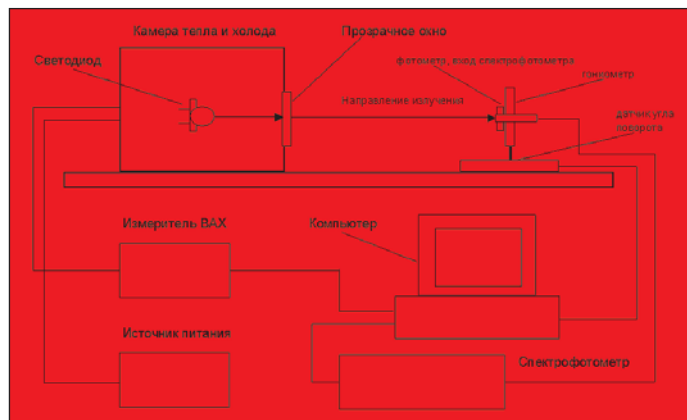


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки для изучения температурных зависимостей светодиодов

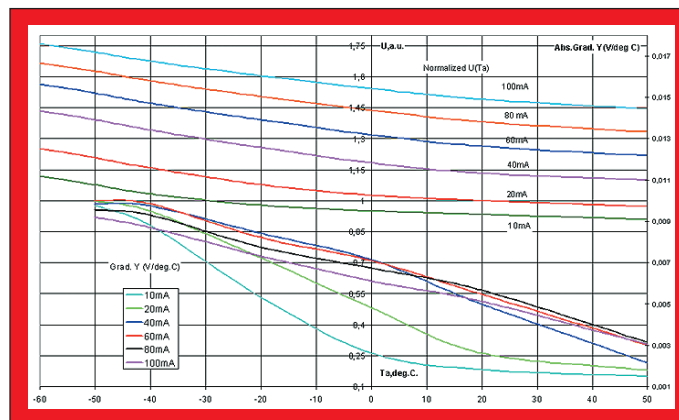


Рис. 4. Относительная зависимость $U_f(T_d)$ светодиодов на основе $\text{Al}_{0,35}\text{Ga}_{0,65}\text{As}$ с $E_g = 1,98$ эВ и $\lambda_{\text{dom}} = 642$ нм (отн. $T_0 = 20$ °C) и распределение градиента напряжения Y по температуре при разных значениях I_f

стей последующих величин будет принято такое же деление.

Приведенные на рис. 4–8 графики показывают, как изменяется прямое напряжение U_f при различных прямых токах I_f у упомянутых структур. Градиент напряжения также зависит от температуры, и его зависимость показана на нижней части рисунков, а абсолютные значения отсчитываются по вспомогательной (правой) оси Y . Все зависимости выведены для реальных светодиодов на основе экспериментальных данных и с учетом расчетов возможности теплопередачи примененных кристаллодержателей. При измерениях обозначенных характеристик на больших плотностях тока применялся светодиод на основе кристаллодержателя, разработанного для применения в приборах с рабочим током до 80 мА (плотность тока $\rho = 100$ А/см²) через кристалл стандартного размера $250 \times 300 \times 250$ мкм, при токах до 30 мА (плотность тока до $\rho = 40$ А/см²) измерения проводились как для такой конструкции кристаллодержателя, так и для стандартной, применяемой в подавляющем большинстве светодиодов с эпоксидной оптикой диаметром 5 мм. В обоих типах светодиодов были применены соответствующие излучающие кристаллы одинаковых конструкций для обеспечения чистоты эксперимента в части различных тепловых свойств разных конструкций: AlInGaP/GaP для красных и желтых фирмы Lumileds на подложке GaP, InGaN/AlGaIn/GaN для синих и зеленых фирмы CREE MBright на подложке SiC.

Результаты экспериментов показали хорошее совпадение температурных зависимостей прямого напряжения U_f светодиодов различных конструкций при указанных плотностях прямого тока ρ , поэтому на приведенных графиках типы светодиодов не дифференцированы. Вольт-амперные характеристики измерялись при нахождении образцов в термокамере (рис. 3), внутри которой была достигнута заданная температура окружающей среды (T_a) двумя методами: импульсным действием тока, исключаяющим разогрев актив-

ной области кристалла и при статическом постоянном токе I_f , вносящем свой вклад в нагрев. В данной статье обсуждаются результаты второго способа измерения, как наиболее интересного для пользователей с практической точки зрения.

Расположенный внутри термокамеры светодиод подключен к источнику питания с возможностью программно изменять ток в диапазоне 0–100 мА с минимальным шагом 0,1 мА, и необходимым временем задержки между включением дискретов (возможность импульсного режима), позволяющий также формировать обратное напряжение на излучателе до 30 В для измерения обратного тока I_r . Фиксированным параметром, относительно которого строятся все зависимости, является ток через кристалл I_f , поэтому он жестко стабилизирован и его величина известна с высокой точностью во время каждого измерения остальных характеристик. Вольт-амперная характеристика измерена с шагом изменения тока при каждой температуре 0,1 мА (1000 значений для 100 мА).

Порядок измерений был выбран следующим. Температура внутри камеры повышалась до верхнего исследуемого предела (+55 °C) и выдерживалась таковой в течение получаса для устранения переходных процессов. После этого вступала в действие установленная программа, обеспечивающая следующую последовательность. Измерялась вольт-амперная характеристика в импульсном режиме. Далее на светодиод подавалось напряжение питания с током первого дискрета измерения статических характеристик — 1 мА. По истечении 30 с (время стабилизации параметров) происходило измерение спектра излучения с максимальным временем накопления несколько секунд (для обеспечения наибольшей точности показаний), одновременно спектрофотометр получал информацию об относительной интенсивности излучения, а внутренний вольтметр источника питания присваивал значение прямого напряжения установлен-

ному току. Абсолютные значения силы света и ее пространственное распределение фиксировал двухкоординатный гониофотометр, поворачивающийся на известный угол относительно оси светодиода в камере с шагом 0,1°. При необходимости снималось несколько плоскостей диаграмм излучения светодиода для наиболее точного расчета светового потока и угловых характеристик. Далее измерялась вольт-амперная характеристика в режиме постоянного прямого тока с учетом разогрева.

Результаты измерения записывались в виде файла, содержащего информацию о температуре, при которой было сделано измерение. Основные типы светодиодов по этой программе для всех перечисленных параметров также были измерены с применением импульсного режима питания с неразогревающим действием прямого тока независимо от его значения [3].

Далее процесс повторялся, но со следующим значением тока. В диапазоне 0–10 мА дискреты были выбраны через 1 мА, в диапазоне 10–100 мА измерения проводились через каждые 10 мА. После измерения последних значений (на токе 100 мА), в камере начинала устанавливаться следующая температура и вся программа повторялась. Таким образом, каждый светодиод каждого цвета имел не менее 20 значений всех параметров на каждой температуре в диапазоне от –60 до +60 °C с шагом в 20 °C (7 дискретов).

Как видно из графиков, градиент напряжения достаточно сильно зависит от температуры у всех светодиодов и имеет устойчивую тенденцию к росту при понижении температуры. Некоторое замедление роста градиента при температурах до –50 °C, скорее всего, связано с тепловым действием тока и уменьшением этого эффекта с понижением температуры, что особенно проявляется при небольших плотностях тока через кристалл, где саморазогрев минимален у светодиодов на основе InGaIn/AlGaIn/GaN . Однако у светодиодов на основе AlGaInP наблюдается домини-

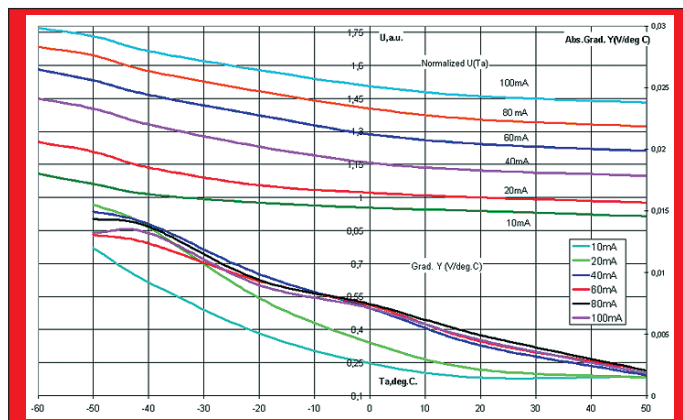


Рис. 5. Относительная зависимость $U_f(T_d)$ светодиодов на основе $\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.2}\text{In}_{0.49}\text{P}$ с $E_g = 2,02$ эВ и $\lambda_{\text{dom}} = 625$ нм (отн. $T_o = 20^\circ\text{C}$) и распределение градиента напряжения Y по температуре при разных значениях I_f

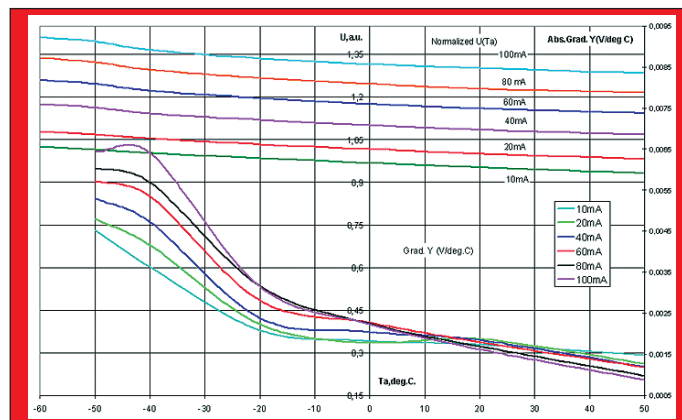


Рис. 6. Относительная зависимость $U_f(T_d)$ светодиодов на основе $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.1}\text{In}_{0.49}\text{P}$ с $E_g = 2,21$ эВ и $\lambda_{\text{dom}} = 592$ нм (отн. $T_o = 20^\circ\text{C}$) и распределение градиента напряжения Y по температуре при разных значениях I_f

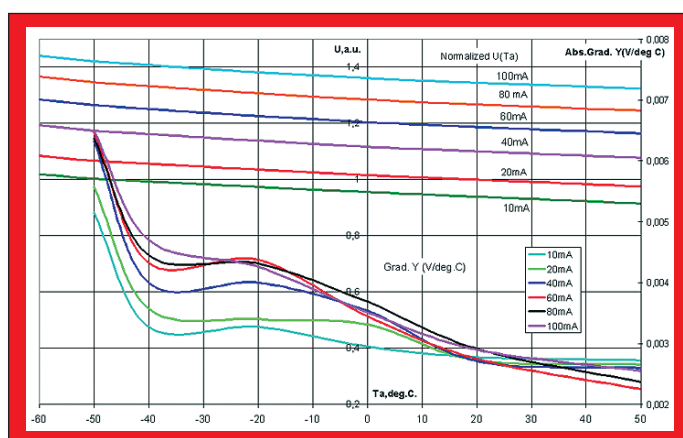


Рис. 7. Относительная зависимость $U_f(T_d)$ светодиодов на основе $\text{InGaIn}/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ с $\lambda_{\text{dom}} = 522$ нм (отн. $T_o = 20^\circ\text{C}$) и распределение градиента напряжения Y по температуре при разных значениях I_f

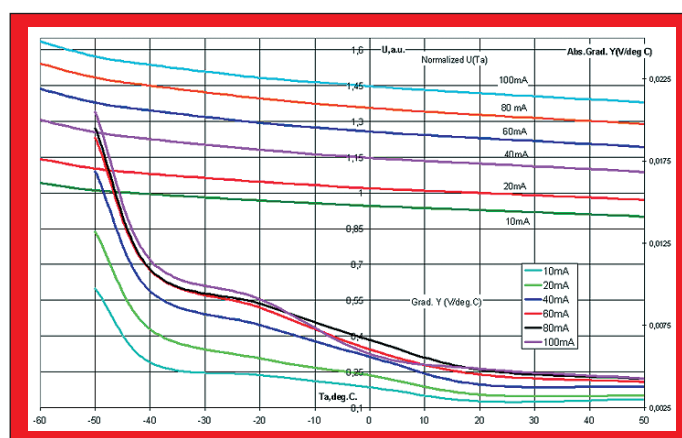


Рис. 8. Относительная зависимость $U_f(T_d)$ светодиодов на основе $\text{InGaIn}/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ с $\lambda_{\text{dom}} = 468$ нм (отн. $T_o = 20^\circ\text{C}$) и распределение градиента напряжения Y по температуре при разных значениях I_f

рование процесса разогрева (кривые при больших плотностях тока имеют гораздо меньшую крутизну) с одной стороны и изменение характера увеличения ширины запрещенной зоны E_g и квантовой эффективности при понижении температуры с другой. Эти обстоятельства следует учитывать тогда, когда речь идет о расчетах электрических режимов работы светодиодов в каком-либо устройстве, которое будет работать при различных температурах окружающей среды. Как правило, достаточно ему находиться на улице, и все перечисленные зависимости будут сказываться обязательно. Стоит также обратить внимание еще и на режимы оконечных каскадов или ключей, нагрузкой которых являются светодиоды при динамическом управлении (табло, вывески, экраны, бегущие строки). Их динамический диапазон и уровень напряжения питания не должны повлиять на излучательные параметры светодиодов при изменении температуры из-за нарушения электрического режима. И без этого характеристики оптического излучения светодиодов существенно изменятся с температурой. Это отражено в графиках на рис. 9–10.

Кроме того, более детальное рассмотрение представленных здесь зависимостей позволит, с одной стороны, правильно оценивать охлаждающую способность кристаллодержателя при разных температурах, которая вырисовывается из поведения градиента Y при различных токах (его уменьшение при увеличении тока I_f при одной и той же температуре свидетельствует об исчерпании охлаждающих свойств из-за несоответствия площади, материала кристаллодержателя и теплового сопротивления «среда — кристалл» тепловому действию тока I_f), а с другой стороны, правильно определить токовый режим работы (рабочий ток) светодиода, исключаяющий его перегрев.

На рис. 9 представлен более привычный вид электрической характеристики — вольт-амперной. Так выглядит семейство кривых при разных температурах. Здесь также видно, что изменяется не только само значение прямого напряжения, но и его градиент. Рис. 10 иллюстрирует изменение потребляемой мощности P_{dis} и динамического сопротивления R_{dyn} светодиодов на основе $\text{InGaIn}/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$. Графики удобны для использования при рас-

четах режимов оконечных каскадов — ключей, управляющих работой светодиода, характеристик теплоотводов и потребляемой электрической мощности.

Энергетические характеристики излучения

Энергетические характеристики светодиодов также существенно зависят от температуры. Самый распространенный и наиболее известный среди пользователей параметр, хотя и достаточно косвенно отображающий энергетику излучения — осевая сила света I_v . Поведение I_v при изменении температуры носит характер, идентичный изменению других важных энергетических параметров — светового потока F и оптической мощности P , поэтому зачастую использованием этой характеристики в самых простых случаях и ограничиваются. Однако как при очень низких ($-20 \dots -60^\circ\text{C}$), так и при высоких (до $+80^\circ\text{C}$) температурах данную зависимость ($I_v(T_d)$) нельзя считать корректной при оценке энергетики оптического излучения светодиода. Не зависящая ни от одного из остальных параметров излучения, осевая сила света дает лишь относительную характеристику в от-

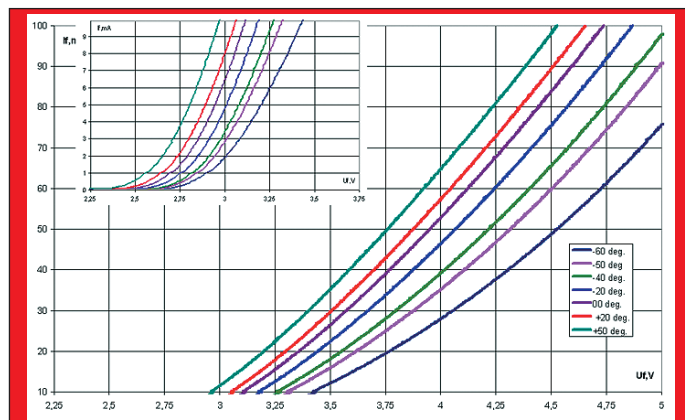


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики светодиодов на основе InGaN/AlGaIn/GaN при различных температурах окружающей среды. На вставке — участки характеристики до 10 мА. Хорошо заметно существенное изменение экспоненциального участка ВАХ с температурой, связанное с изменением плотности состояний и скорости рекомбинации

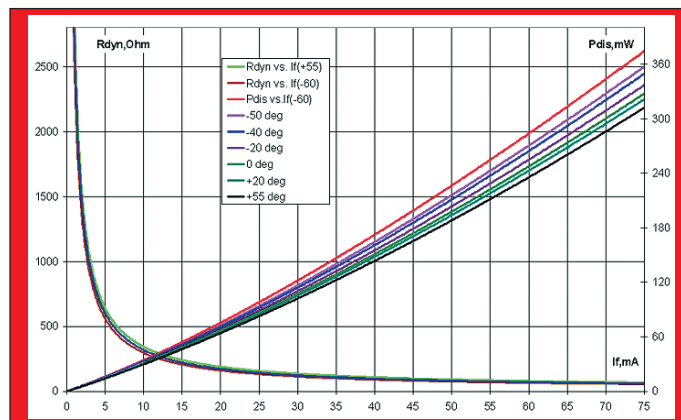


Рис. 10. Зависимости потребляемой электрической мощности P_{dis} и динамическое сопротивление R_{dyn} светодиодов на основе InGaN/AlGaIn/GaN при различных температурах окружающей среды

личие от интегрального светового потока F , который зависит не только от изменения интенсивности излучения с температурой, но и от перераспределения его плотности по поверхности кристалла, и, как следствие, от изменения вида диаграммы направленности

излучения светодиода. Оптическая мощность P имеет еще более сложную зависимость из-за одновременного учета изменения светового потока и спектрального состава излучения, который также очень значительно изменяется с температурой и бу-

дет описан в следующей части статьи. Поэтому ограничимся рассмотрением и сравнением зависимостей осевой силы света и светового потока от температуры.

Как и при обсуждении электрических характеристик, в измерениях зависимостей $F(I_f)$

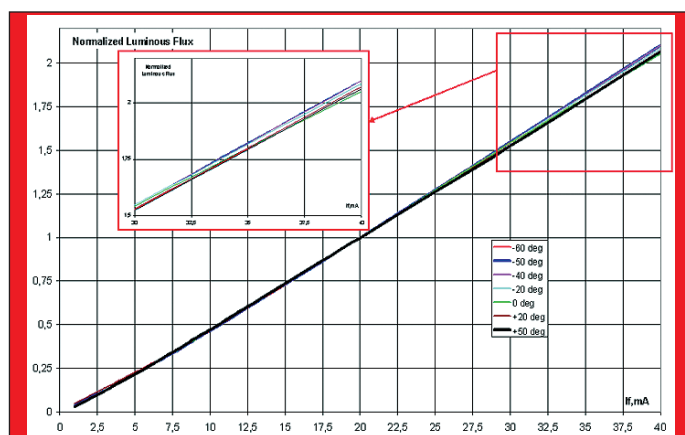


Рис. 11. Относительные люмен-амперные ($F(I_f)$) зависимости светодиодов на основе $\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.21}\text{In}_{0.49}\text{P}$ с $\lambda_{dom} = 625$ нм (отн. $I_f = 20$ мА) при различных температурах окружающей среды от -60 до $+50$ °C

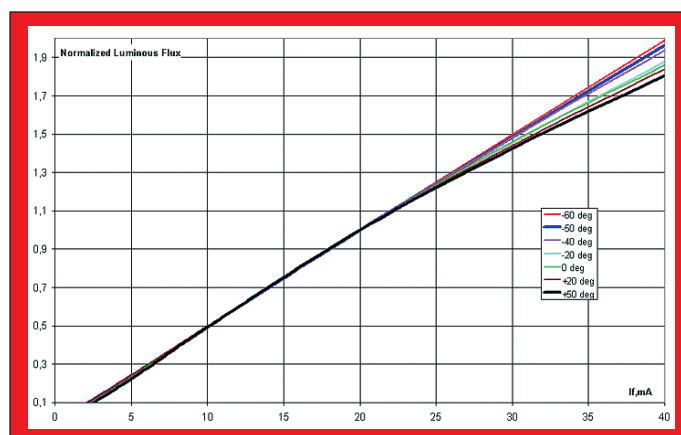


Рис. 12. Относительные люмен-амперные ($F(I_f)$) зависимости светодиодов на основе $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.16}\text{In}_{0.49}\text{P}$ с $\lambda_{dom} = 592$ нм (отн. $I_f = 20$ мА) при различных температурах окружающей среды от -60 до $+50$ °C

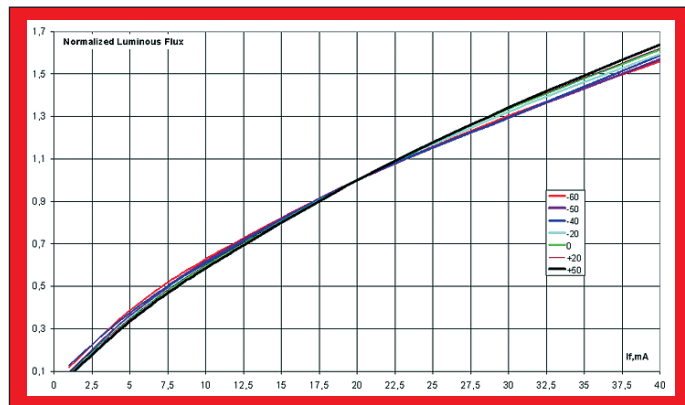


Рис. 13. Относительные люмен-амперные ($F(I_f)$) зависимости светодиодов на основе InGaIn/AlGaIn/GaN с $\lambda_{dom} = 522$ нм (отн. $I_f = 20$ мА) при различных температурах окружающей среды от -60 до $+50$ °C

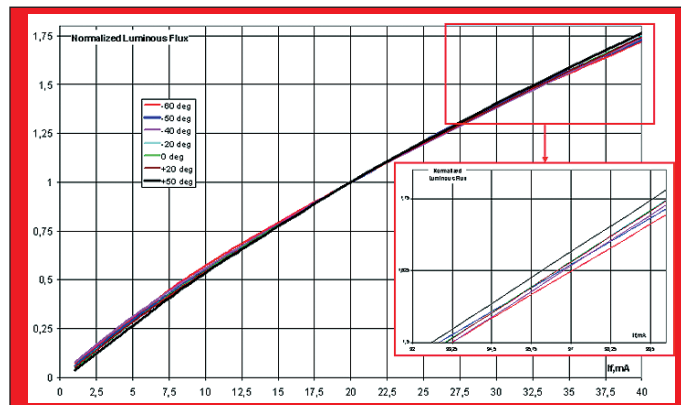


Рис. 14. Относительные люмен-амперные ($F(I_f)$) зависимости светодиодов на основе InGaIn/AlGaIn/GaN с $\lambda_{dom} = 469$ нм (отн. $I_f = 20$ мА) при различных температурах окружающей среды от -60 до $+50$ °C

также был применен режим стабилизации прямого тока I_f через светодиод при изменяющемся от температуры напряжении U_f .

Как видно из графиков на рис. 11–14, люмен-амперные характеристики мало зависят от температуры окружающей среды. Их отличие обусловлено лишь тепловым действием прямого тока. И там, где его действие более эффективно, например, из-за снижения эффективности охлаждения кристалла, различия более заметны. Для наглядного примера стоит привести люмен-амперную характеристику светодиодов на основе InGaN/AlGaIn/GaN, измеренную в импульсном режиме, который исключает разогрев кристалла прямым током (рис. 15). Хорошо видно, что эти зависимости практически совпадают.

Диаграммы на рис. 16 показывают изменение осевой силы света светодиода с температурой при условии стабилизации одного параметра из двух: I_f или U_f . При значениях прямых токов с плотностью, выходящей за пределы указанного на диаграмме диапазона, наклон кривых может меняться в зависимости от типа кристаллодержателя. Однако следует также иметь в виду и тот факт, что будучи значительно связанной с параметрами и материалом оптической системы светодиода, осевая сила света I_v непременно будет изменяться по другому закону, если диаграм-

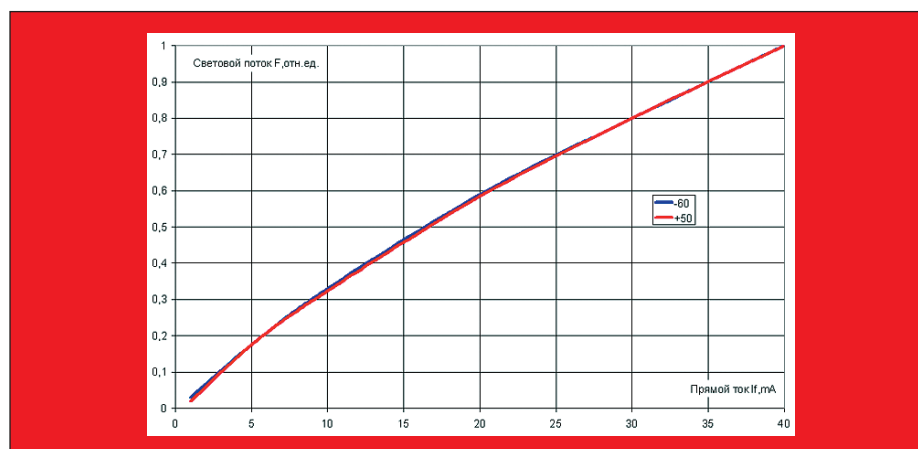


Рис. 15. Относительные люмен-амперные ($F(I_f)$) зависимости светодиодов на основе InGaN/AlGaIn/GaN при крайних температурах окружающей среды от -60 до $+50$ °C, измеренные импульсным методом, без разогрева излучающего кристалла током I_f

ма пространственного излучения светодиода будет менее 15° и более 90° по уровню 0,5, или в случае применения диспергатора в составе линзы. Помимо изменения геометрических размеров оптической системы и оптических свойств ее материала с температурой, это вызвано также перераспределением областей излучательной рекомбинации по объему кристалла, который является ис-

точником излучения и на который настроена эта оптика.

Изменение конфигурации источника приводит к рассогласованию всей оптической системы светодиода, могущей состоять из трех или более элементов (в простом случае: кристалл — лунка — линза, в более сложных: кристалл — лунка — кремнийорганический наполнитель — люминофор — линза Френеля).

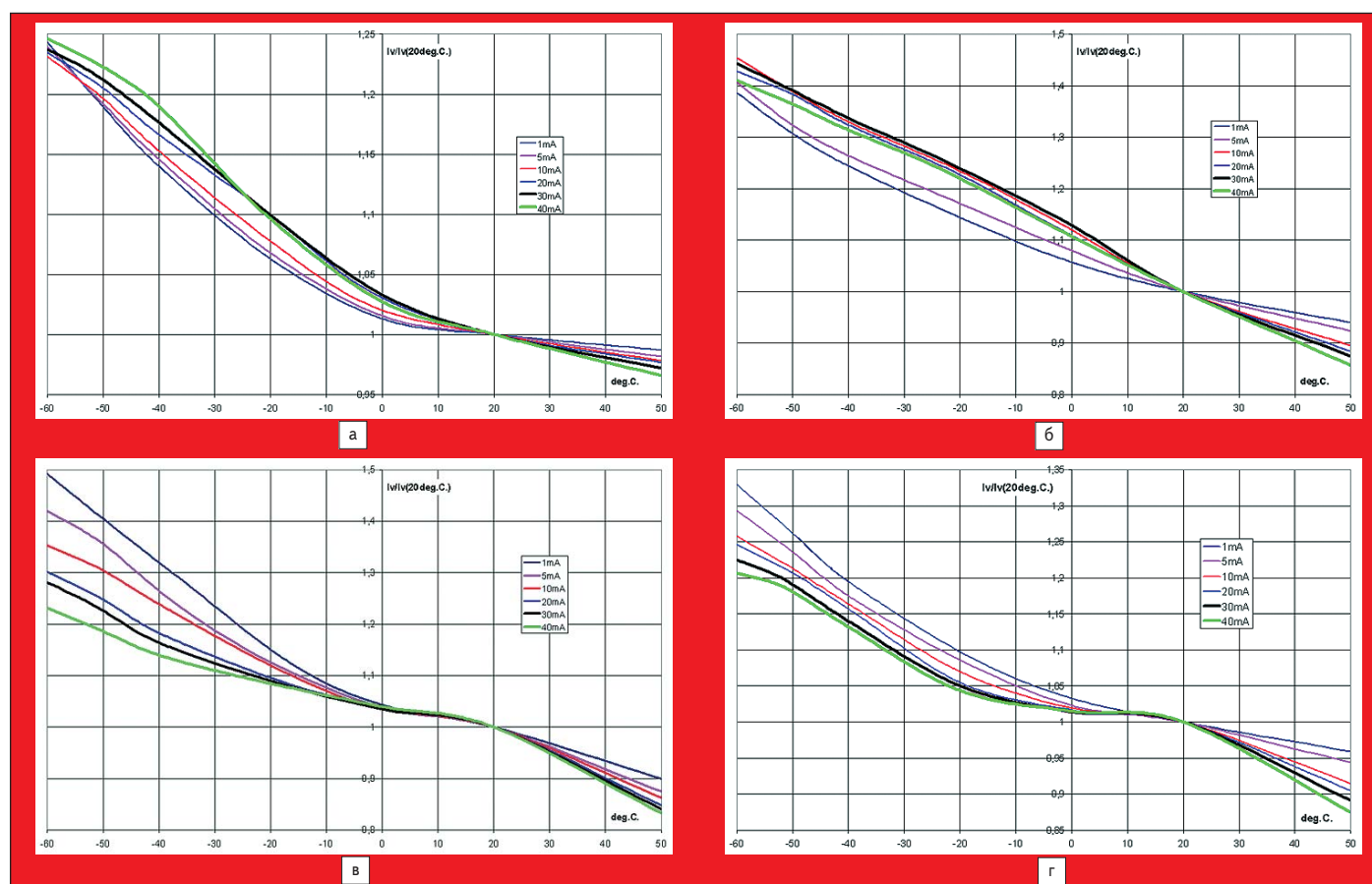


Рис. 16. Относительные зависимости осевой силы света светодиодов при различных температурах окружающей среды от -60 до $+55$ °C. Диаграммы справедливы для плотностей тока через кристалл $1,5\text{--}60$ А/см² и даны относительно $t_0 = +20$ °C: а) на основе GaAs, б) на основе AlGaInP, в) на основе InGaN/AlGaIn/GaN с $\lambda_{\text{dom}} = 525$ нм, г) на основе InGaN/AlGaIn/GaN с $\lambda_{\text{dom}} = 468$ нм

В указанном диапазоне углов излучения (15–90°) оптическая система оказывает оптимальное влияние на ход лучей и обладает максимальным коэффициентом концентрации светового потока внутри диаграммы направленности с наименьшими потерями, поэтому изменения характеристик источника сказываются минимально. Однако когда система формирует малый (меньше 10° по уровню 0,5) угол излучения, ее КПД (коэффициент сбора потока) уменьшается, а любая несогласованность составляющих ее элементов становится очень заметной, в то время как угол излучения светодиода стремится к значениям более 100°, близким к характерным для кристалла без оптики (линза не обладает достаточной оптической силой), объемное перераспределение излучения кристалла может изменить диаграмму направленности свето-

диода, являясь доминирующим при ее формировании относительно оптики. Именно поэтому можно заметить, что динамика изменения светового потока, показанная на рис. 11–14 отличается от динамики осевой силы света. Все сказанное объясняет применение зависимостей, показанных на рис. 16, лишь с указанной оговоркой.

Во второй части статьи будут обсуждаться колориметрические характеристики в зависимости от температуры и особенности восприятия глазом человека излучения светодиодов в свете этих зависимостей.

Автор выражает особую благодарность за организацию и поддержку экспериментов: Абрамову Владимиру Семеновичу, к. т. н., Аникину Петру Павловичу, к. ф-м. н., Сушкову Валерию Петровичу, д. т. н.

Продолжение следует.

Литература

1. Мосс Т. Полупроводниковая оптоэлектроника. М.: Мир. 1976.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Том 1-2. М.: Мир. 1984.
3. Абрамов В. С., Никифоров С. Г., Соболев П. А., Сушков В. П. Свойства зеленых и синих InGaN-светодиодов // Светодиоды и лазеры. 2002. № 1–2.
4. Агафонов Д. Р., Мурашова М. А., Никифоров С. Г., Пинчук О. П., Столяревская Р. И. Исследования визуального восприятия красных железнодорожных светофоров на основе СИД // Светотехника. 2003. № 6.
5. Иваницкий Г. Вернисаж инфракрасных портретов // Наука и жизнь. 2005. № 8.
6. Цвета световых сигналов. Официальные рекомендации Международной комиссии по освещению (МКО). Публикация МКО № 2.2 (ТС-1.6). 1975.