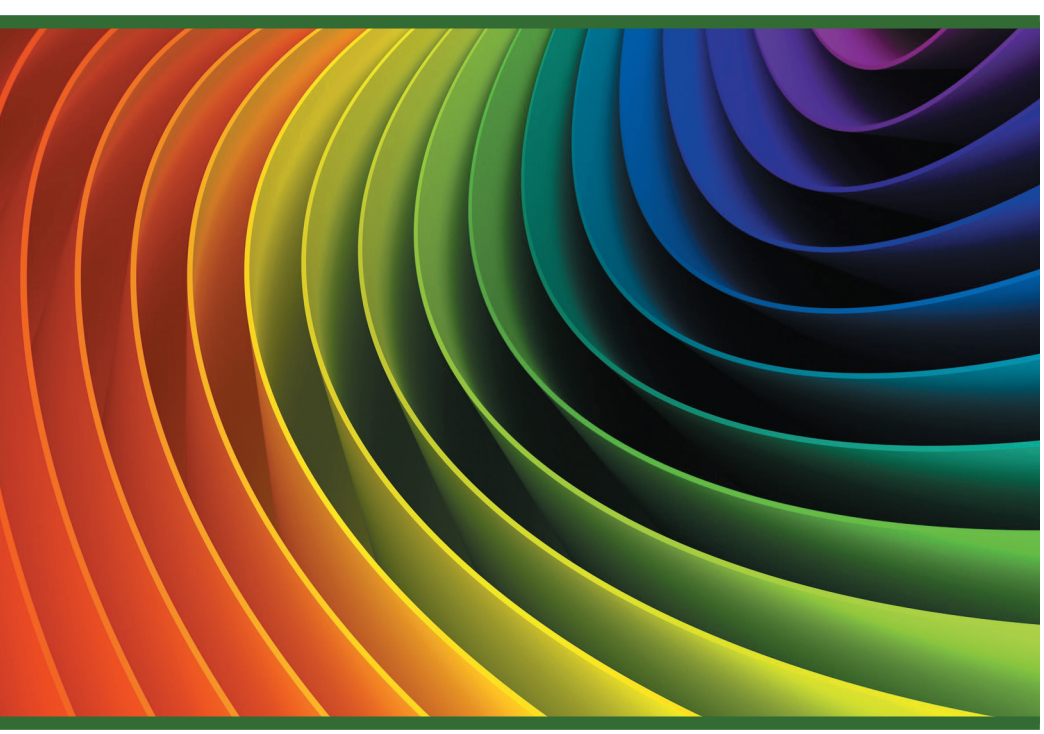
Моника Хансен (Monica Hansen) | Дж. Линн Дэвис (J. Lynn Davis)
Перевод: Василина Рочева

Прогнозирование сдвига цветности светодиодов

Проведено исследование характеристик сдвига цветности светодиодов четырех основных типов, используемых в светотехнике: в керамических и полимерных корпусах, чип-на-плате (COB) и в соразмерных чипу корпусах (CSP). Для оценки недавно опубликованного Светотехническим обществом Северной Америки (Illuminating Engineering Society, IES) метода прогнозирования долгосрочного сдвига цветности (TM-35-19) использовались наборы данных LM-80 от основных производителей светодиодов.

Точность метода TM-35-19 для прогнозирования сдвигов цветности оценивалась с помощью шести наборов данных. Проведенный анализ показал, что TM-35-19 часто дает консервативные оценки величины сдвига цветности, при этом данный метод не так надежен в определении направления цветового сдвига. Модель оказывается более точной, если известна фаза появления терминального сдвига цветности и есть по крайней мере некоторые данные, указывающие на то, что это появление произошло. Проблемой является сильное влияние интервала измерений LM-80 на точность прогноза, поскольку на прогноз сдвига цветности может существенно повлиять информация, которую производитель светодиодов предоставляет в отчете LM-80-15. Однако при понимании ограничений такая модель может оказаться полезной для светотехнической отрасли.



Введение

На рынке доступны различные типы светодиодов, предназначенных для решения самых разных светотехнических задач. Из-за такого разнообразия доступных вариантов для создания источников света используется широкий набор материалов и методов производства. Для лучшего представления о сроке службы и надежности светодиодов проведено исследование по оценке четырех основных типов светодиодов с люминофором: керамических, полимерных, чип-на-плате (COB) и с соразмерным чипу корпусом (CSP). У светодиодов редко случаются внезапные отказы (когда они перестают излучать свет). Обычно происходят параметрические отказы, такие как снижение светового потока или сдвиг цветности, причина которых кроется в выборе материалов и методов конструирования. Важность стабильности цветности зависит от области применения светодиодов, и для некоторых задач влияние этого параметра может быть более критичным фактором, чем снижение яркости, — например, в музеях или розничных магазинах, где для освещения стен используется несколько ламп или светильников или где объекты оцениваются на основе их цвета, в частности в больницах или на заводах.

Различные светодиоды можно сгруппировать по четырем основным типам, представленным на рис. 1:

- Мощные керамические светодиоды (1–5 Вт) состоят из светодиодного кристалла, установленного на керамическую подложку, поверх кристалла нанесен люминофорно-силиконовый композит и отлита силиконовая полусферическая линза. Такие светодиоды обычно используются там, где требуется высокая мощность и надежность, либо в источниках света небольших размеров, таких как лампы направленного света.
- Светодиоды средней мощности в полимерном корпусе (0,2–1 Вт) с одним или двумя небольшими кристаллами, установленными на металлическую выводную рамку, встроенную в полимерный корпус и заполненную инкапсулянтом, содержащим люминофор. Эти светодиоды созданы на основе выводных рамок по аналогии с микросхемами в пластиковых корпусах. Они в основном используются в светильниках общего назначения.
- CSP-светодиоды (1–3 Вт), также часто называемые бескорпусными светодиодами, состоят из светодиодного flip-chip-кристалла, покрытого люминофором для получения белого света, в некоторых моделях имеются белые отражающие боковые стенки вокруг кристалла, необходимые для предотвращения выхода излучения с боковых поверхностей. Поскольку корпус имеет ту же площадь, что и светодиодный чип, светодиоды можно плотно установить в массивы, уменьшив тем самым общий размер светильника.
- COB-светодиоды (10–80 Вт) значительно различаются по размеру и мощности. Они содержат несколько небольших светодиодных кристаллов, установленных на металлической печатной плате или керамической подложке, которые затем покрываются инкапсулянтом, содержащим люминофор. Они используются в тех случаях, когда требуется высокая яркость от источника небольшого размера или высокая плотность светового потока.

Методология

Для оценки надежности и долговечности светодиодов необходимы согласующиеся экспериментальные измерения. В 2008 году Светотехническое общество Северной Америки опубликовало стандарт LM-80 «Утвержденный метод: Измерение стабильности светового потока светодиодных источников света» [1]. Процедура LM-80-08 требовала, чтобы измерения светового потока и цветности для репрезентативной выборки светодиодов (обычно 20–25) проводились не реже одного раза в 1000 ч, в течение как минимум 6000 ч при каждом из нескольких условий испытаний. В сочетании с методикой IES TM-21-11 она позволяла прогнозировать стабильность светового потока с использованием модели экспоненциального затухания [2].

В 2015 году IES и Американский национальный институт стандартов (ANSI) одобрили новый, переработанный стандарт LM-80 (обозначенный LM-80-15), обеспечивающий стандартизированный подход к сбору и представлению данных о стабильности как светового потока, так и цветности [3]. В LM-80-15 требуется протоколирование значений координат цветности (u' и v'), тогда как в LM-80-08 необходимо было протоколировать только величину сдвига цветности (Δu'v'), не содержащую информации о направлении сдвига.

Хотя уже в 2011 году была доступна методология прогнозирования стабильности светового потока, прогнозирование сдвига цветности оказалось гораздо более сложной задачей. Возможность прогнозировать сдвиг цветности светодиодов даст отрасли больше информации об ожидаемых долгосрочных характеристиках светодиодов, интегрированных в светильники. После большой работы, проделанной комитетом, ANSI и IES выпустили в конце 2019 года технический меморандум TM-35-19 для прогнозирования стабильности цветности с использованием отдельных координат цветности u' и v', содержащихся в наборах данных LM-80-15 [4].

Данная публикация является частью длительного исследования надежности светодиодов. В период 2011–2020 гг. проведен анализ данных LM-80 по нескольким производителям, позволяющий по-новому взглянуть на факторы, влияющие на характеристики светодиодов. Чтобы помочь определить общие черты, наблюдаемые в отношении надежности светодиодов, многие ведущие производители светодиодов предоставили нашей команде более 400 различных наборов данных LM-80 (рис. 2).

Первое исследование характера изменений параметров светодиодов было проведено в 2014–2015 гг. с использованием отчетов LM-80-08, подготовленных в период 2011–2015 гг. для оценки стабильности светового потока и цветности светодиодов, собранных с использованием различных корпусов из различных материалов [5]. В 2019 году начался следующий этап исследования, призванный показать,

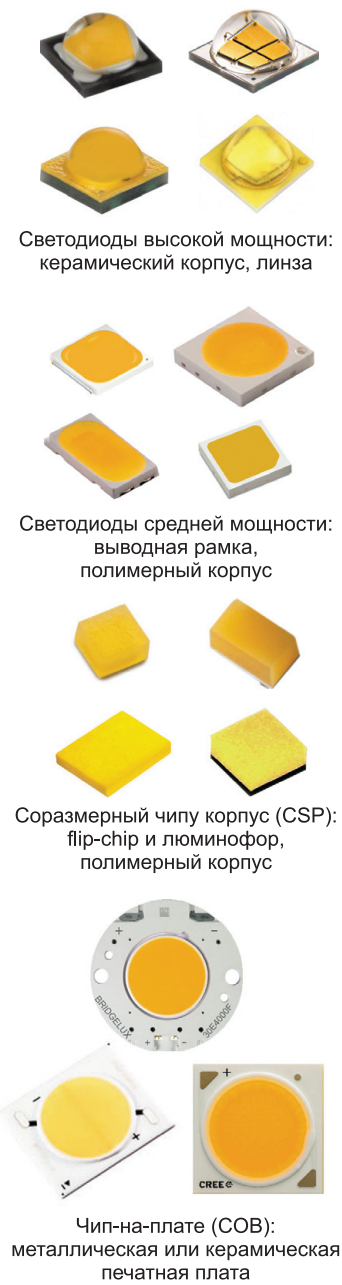


Рис. 1. Типичные примеры светодиодов четырех основных типов, включая (сверху) мощные керамические светодиоды, светодиоды средней мощности в полимерном корпусе, CSP- и COB-светодиоды

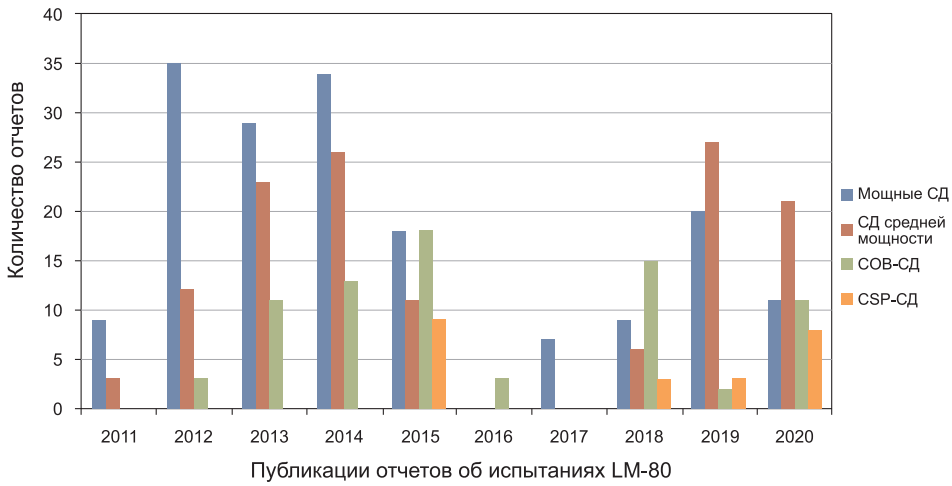


Рис. 2. Распределение наборов данных LM-80 по годам завершения испытаний и типу светодиодов

Описание испытуемого светодиодного источника света (производитель, модель, номер по каталогу)	Значение
Номинальный бин цветности ANSI C78.377, K	
Размер выборки	
Количество отказов	
Ток, подаваемый на испытуемое устройство, мА	
Температура корпуса, °C	
Продолжительность испытания, ч	
Интервал измерения, ч	
Опорное значение времени, ч	
Опорное значение δu'	
Опорное значение δv'	
Наклон δu'*	
Отрезок δu'*	
Наклон δv' *	
Отрезок δv'*	
CS4, ч	
CS7, ч	

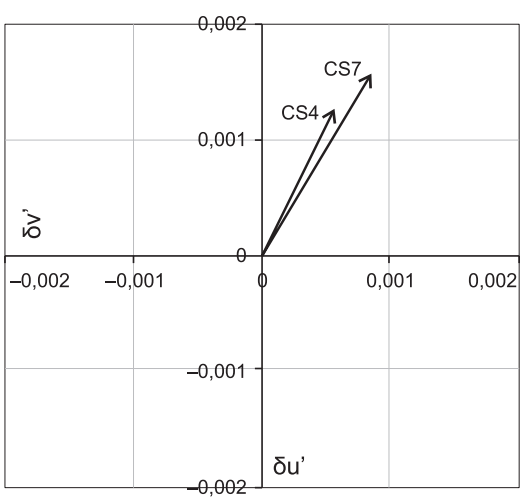


Рис. 3. Образец информации, которая должна входить в отчет TM-35-19, включая таблицу с часами CS4 и CS7 (время достижения сдвига цветности Du'v' 0,004 и 0,007 соответственно) и векторную диаграмму, показывающую направление и величину сдвига цветности [4]

насколько светодиоды улучшились по сравнению с первым исследованием. Во втором исследовании оценивались отчеты за 2018–2020 гг. Изучению стабильности цветности способствовало гораздо большее количество отчетов LM-80-15 со значениями координат u' и v'. В этой статье основное внимание будет уделено данным, собранным с 2018 года.

Анализ TM-35-19

Недавно опубликованный технический меморандум ANSI/IES TM-35-19 опирается на дифференциальный анализ цветности (differential chromaticity analysis, DCA), позволяющий прогнозировать значения координат цветности u' и v' на основе данных, накопленных в процессе выполнения испытаний по LM-80-15. В методе DCA аппроксимируются и экстраполируются изменения цветности. При этом прогнозируется время, за которое значение сдвига цветности превысит максимально допустимый уровень (например, CS4 соответствует Δu'v' = 0,004 или 0,007 — CS7). Следует отметить, что метод DCA не должен использоваться для прогнозирования сдвига цветности, превышающего значение Δu'v', равное 0,01. Согласно требованиям TM-35-19, отчет должен содержать прогнозируемые значения времени наступления пороговых сдвигов цветности CS4 и CS7 и векторный график прогнозируемого направления сдвига цветности, как, например, показано на рис. 3.

Модель DCA предполагает три фазы изменения цветности светодиодов с течением времени:

- инкубация — быстрое кратковременное увеличение Δu'v' с последующим длительным периодом, в течение которого значение Δu'v' практически не меняется;
- восстановление — иногда за инкубационным периодом следует снижение Δu'v';
- рост — практически линейный рост Δu'v' до тех пор, пока не будет достигнут порог сдвига цветности, что считается окончанием срока службы светодиода.

Следует обратить внимание, что период восстановления наблюдается не всегда. Иногда фаза роста начинается непосредственно после фазы инкубации, минуя восстановление. Это может быть связано со степенью воздействия на светодиод

(температуры или тока). На рис. 4 показаны два примера, демонстрирующие различные модели изменения сдвига цветности.

Цель проводимого исследования состояла в том, чтобы понять, насколько точно TM-35-19 предсказывает сдвиг цветности светодиодов. Для определения точности прогнозирования использовались три критерия.

1. Модель должна обеспечивать точный прогноз сдвига цветности (Δu'v'). Как минимум, оценки должны быть консервативными, то есть давать более низкое значение CS4 или CS7, поскольку более длительный прогнозируемый период стабильности цветности может привести к параметрическому отказу светодиода раньше, чем дал прогноз по методике TM-35-19.
2. Модель должна точно прогнозировать направление сдвига цветности. Она должна предсказать направление сдвига в соответствии с известными физическими механизмами деградации светодиодов.
3. Модель должна обеспечивать согласующийся прогноз цветности для данного светодиодного источника света в условиях испытаний, которые вызывают одну и ту же фазу сдвига цветности (то есть инкубацию, восстановление или рост); однако время, в течение которого протекают разные фазы и происходят соответствующие сдвиги цветности, может изменяться в зависимости от условий эксплуатации светодиода.

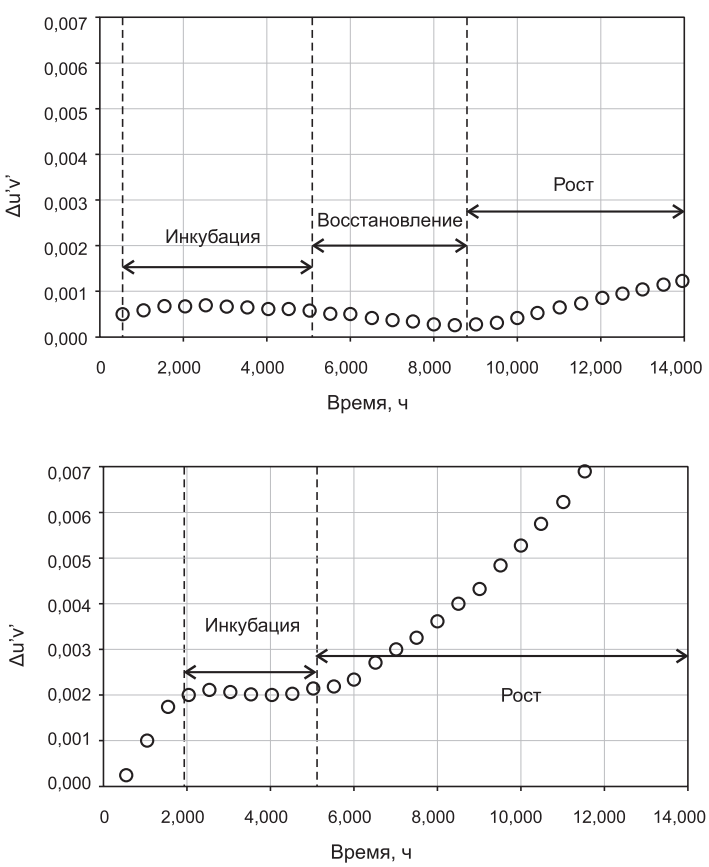


Рис. 4. Примеры изменения сдвига цветности светодиодов, иллюстрирующие фазы инкубации, восстановления и роста (вверху) и инкубацию, следующую непосредственно за фазой роста (внизу) [4]

Следует иметь в виду, что эти критерии не являются взаимообусловленными. Например, модель может точно предсказывать будущие значения величины сдвига цветности (Δu'v'), но плохо предсказывать направление сдвига цветности или наоборот.

В этом исследовании проанализировано 146 наборов данных, соответствующих требованиям LM-80-15, 115 из которых содержали 10 000 или более результатов измерений. Чтобы понять способность TM-35-19 прогнозировать сдвиги цветности, была оценена его точность относительно этих трех критериев с помощью серии из шести исследований. Полученные результаты здесь приведены обобщенно, более подробную информацию обо всем исследовании можно найти в недавно опубликованном отчете [6].

Исследование 1. Мощные светодиоды

В данном исследовании рассматривались мощные светодиоды во время работы при больших нагрузках. Испытание

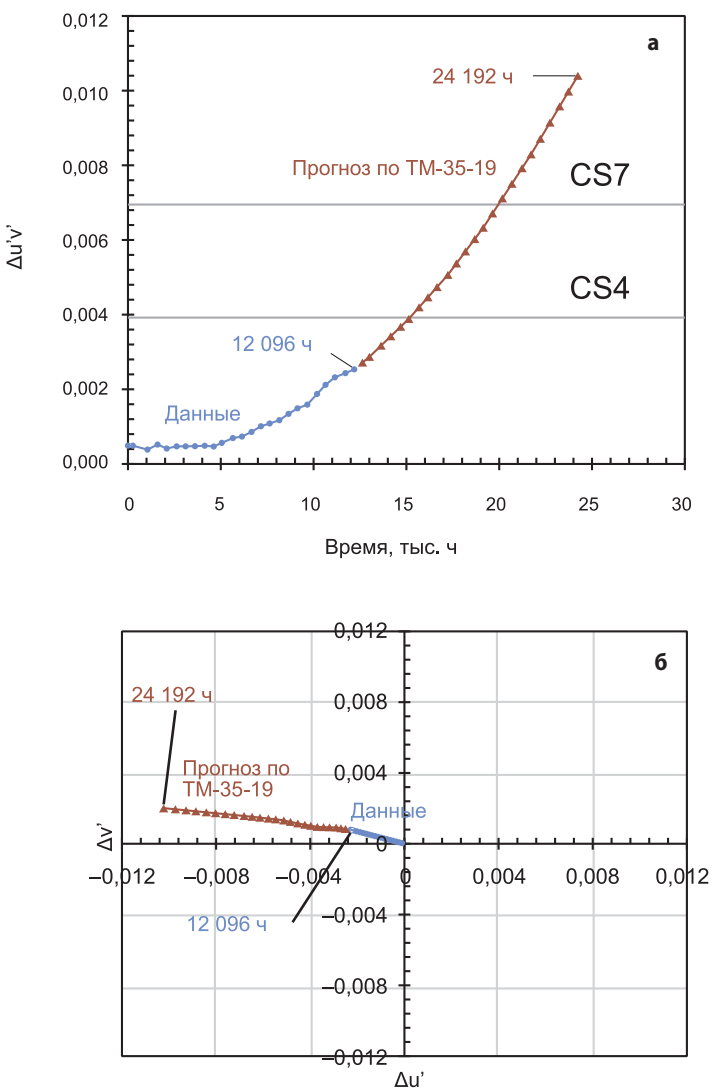


Рис. 5. Прогноз по TM-35-19 для мощных светодиодов в керамических корпусах, исследование 1: а) сдвиг цветности; б) прогнозируемое направление сдвига цветности. Синие точки — экспериментальные данные, красные — прогноз по TM-35-19. Светодиоды работали при температуре +120 °C и токе 700 мА

Таблица. Сравнение результатов ТМ-35-19 для исследований 1–3

Условия испытаний	Продолжительность испытаний, ч	Интервал измерений, ч	CS4, ч	CS7, ч	Соответствие критериям оценки	Исследование
+120 °C и 700 мА	12 096	504	15 400	20 100	Да	1
+85 °C и 700 мА			39 700	53 700		2
+85 °C и 700 мА	24 192		46 000	61 000	Не определено	3
+85 °C и 700 мА		1008	83 900	102 500	Нет	3

проводилось при токе 700 мА и температуре +120 °C в течение 12 000 ч. Данные LM-80-15 (синяя кривая) были введены в модель DCA ТМ-35-19, и характер изменений был экстраполирован с длительностью 24 000 ч (красная кривая), как показано на рис. 5.

Ключевые выводы: модель обеспечивает разумное прогнозирование Δu'v' для этих данных (удовлетворяет критерию 1). Критерии 2 и 3 выполняются, поскольку прогнозы являются продолжением существующих наборов данных.

Исследование 2. Мощные светодиоды при увеличении длительности испытаний

Это исследование опиралось на данные тех же мощных светодиодов, что и исследование 1, но оценивался набор данных LM-80-15 с более длительной наработкой. Светодиоды также измерялись при токе 700 мА, но при температуре +85 °C вместо +120 °C. Как и прежде, для прогнозирования ТМ-35-19 (красная кривая) использовались данные измерений за 12 000 ч по LM-80 (синяя кривая). Затем, чтобы оценить, насколько точным был

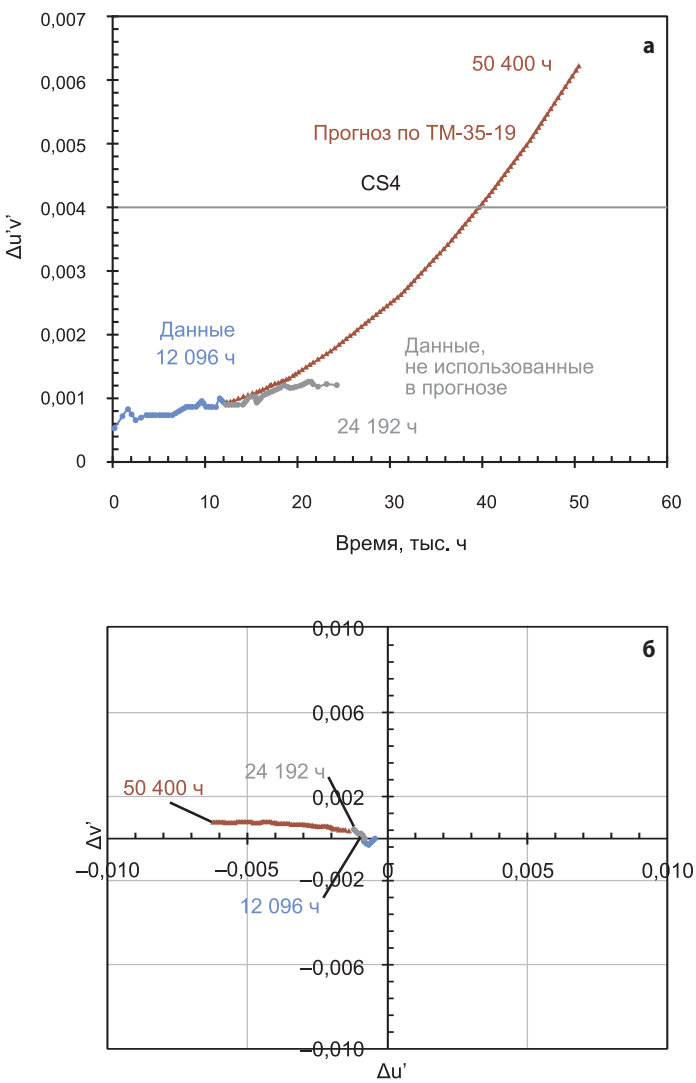


Рис. 6. Прогноз по ТМ-35-19 для мощных светодиодов в керамических корпусах, исследование 2: а) сдвиг цветности; б) прогнозируемое направление сдвига цветности. Синие точки — экспериментальные данные; красные — прогноз по ТМ-35-19; серые — дополнительные данные, не использованные в прогнозе. Светодиоды работали при температуре +85 °C и токе 700 мА

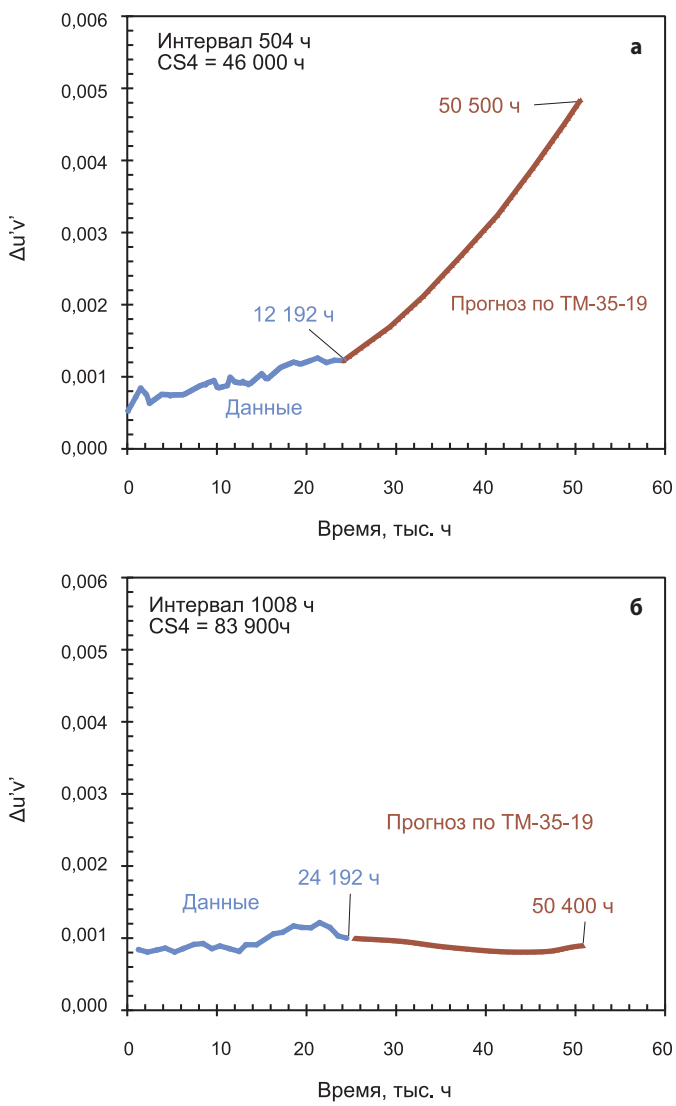


Рис. 7. Прогноз по ТМ-35-19 для мощных светодиодов в керамических корпусах, исследование 3: а) сдвиг цветности с интервалами измерений 504 ч; б) сдвиг цветности с интервалами измерений 1008 ч. Синие точки — экспериментальные данные; красные — прогноз по ТМ-35-19. Светодиоды работали при температуре +85 °C и токе 700 мА

прогноз, данные сравнивались с результатами испытаний, накопленными за 24 000 ч наработки (серая кривая) (рис. 6).

Ключевые выводы: прогноз показывает консервативную оценку для Δu'v' (удовлетворяющую критерию 1), но прогнозируемое значение Δu' намного больше, чем получено путем фактических измерений за 24 000 ч испытаний. Прогноз показывает сдвиг цветности в направлении зеленого цвета, но реальные данные показывают больше изменений в сторону желтого. Предсказанное направление сдвига цветности представляется неточным (не удовлетворяющим критерию 2).

Исследование 3. Мощные светодиоды при различных интервалах измерений

В третьем исследовании изучались те же мощные светодиоды, что и в первых двух, но оно было посвящено чувствительности модели DCA к интервалу измерений. Сравнивались наборы данных LM-80-15 с двумя различными интервалами измерений — каждые 504 ч и каждые 1008 ч. В этом случае все 24 000 ч измеренных данных были введены в прогноз TM-35-19 (рис. 7).

Ключевые выводы: прогноз для Δu'v' не является консервативным при использовании интервала измерений 1008 ч. Он предсказывает время CS4 почти вдвое больше, чем дает прогноз на основе данных, полученных с интервалом измерения 504 часа, и, таким образом, не удовлетворяет критерию 1. Существует также различие в прогнозе направления сдвига цветности для этих двух интервалов, что не соответствует критериям 2 и 3 [6].

Первые три исследования метода TM-35-19, выполненные с использованием одинаковых мощных светодиодов, сравниваются в таблице. Из этого сравнения получены следующие выводы:

- Время достижения уровней CS4 и CS7 соответствует ожидаемому, при более жестких условиях эксплуатации время уменьшается.
- Большое увеличение времени CS4 и CS7 при изменении интервала измерений указывает на высокую степень чувствительности к этому параметру.
- В большинстве отчетов LM-80 представлены данные только до 10 000 ч и с шагом в 1000 ч. Результаты исследований 1–3 показывают, что при использовании метода TM-35-19 такие данные могут стать причиной ошибочного прогноза.

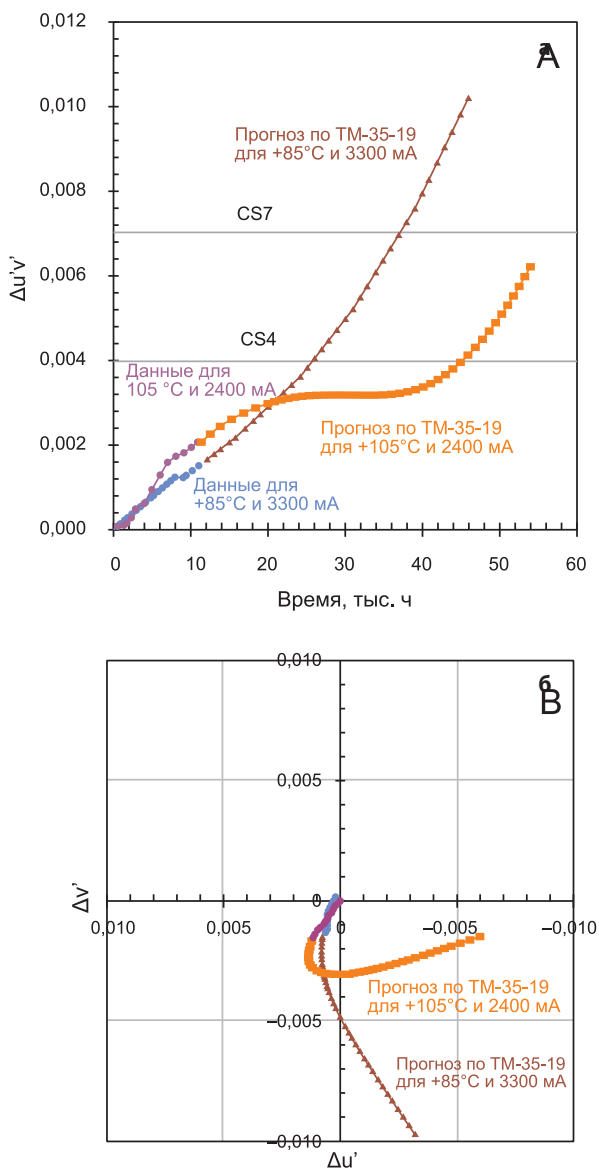


Рис. 8. Прогноз по TM-35-19 для COB-светодиодов с металлической подложкой, исследование 4: а) сдвиг цветности; б) прогнозируемое направление сдвига цветности

Исследование 4. COB-светодиоды

В данном исследовании оцениваются наборы результатов измерений COB-светодиодов продолжительностью 12 000 ч при различных условиях испытаний (ток и температура) — +85 °C при 3300 мА (синие точки) и +105 °C при 2400 мА (фиолетовые точки) (рис. 8).

Ключевые выводы: при более низких температурах CS4 и CS7 наступали гораздо раньше. Это не соответствует критерию 1 (не является консервативной оценкой). Прогнозируемые моделью направления сдвига цветности для двух условий существенно различаются, что обусловлено значительной разницей в прогнозируемых значениях Δv'. Согласно прогнозу при температуре +85 °C цветность должна смещаться в сторону пурпурных цветов, что противоречит механизмам сдвига цветности, наблюдаемым у белых светодиодов с люминофорами [6]. Результат такого прогнозирования не соответствует критерию 2, поскольку прогнозируемое направление сдвига цветности крайне маловероятно. Несоответствие в прогнозируемых сдвигах цветности для этих двух выборок нарушает критерий 3.

Исследование 5. Светодиоды средней мощности

В этом пятом исследовании прогнозирования TM-35-19 была дана оценка светодиодам средней мощности с использованием 10 000 ч накопленных данных LM-80-15 (синяя кривая) для прогноза (красная кривая) при +85 °C и 150 мА, что показано на рис. 9. Чтобы понять, насколько точным был прогноз при использовании первых 10 000 ч измеренных данных, его результаты сопоставлялись с измерениями, полученными до накопления 17 000 ч наработки согласно LM-80 (серая кривая).

Ключевые выводы: прогноз для Δu'v' является консервативным (удовлетворяющим критерию 1), поскольку согласно ему CS4, по-видимому, достигается заведомо раньше достижения 17 000 ч

наработки (серая кривая). Однако модель, по-видимому, завышает значение Δu', что приводит к прогнозу зеленого смещения, не соответствующего дополнительным измеренным данным: 17 000 ч измеренных данных показывают сдвиг в синем направлении (из-за того, что v' входит в фазу роста сдвига цветности). Это не соответствует критерию 2 из-за неточного предсказания направления сдвига цветности.

Если для экстраполяции TM-35-19 используются полные 17 000 ч данных LM-80-15, то прогноз изменяется (рис. 10). Набор данных за 10 000 ч все еще не дошел до фазы роста, что привело к предсказанию сдвига в зеленую область, противоречащему фактическим данным, накопленным на протяжении 17 000 ч. При использовании полных 17 000 ч в прогнозе светодиоды достигают фазы роста и прогнозируется пурпурный сдвиг (весьма маловероятный при известных механизмах физической деградации белых светодиодов с люминофором). Прогноз для Δu'v' консервативен (соответствует критерию 1) при использовании 17 000 ч данных LM-80, но значение Δv', вероятно, завышено, что приводит к прогнозируемому смещению к пурпурному цвету (не соответствует критерию 2).

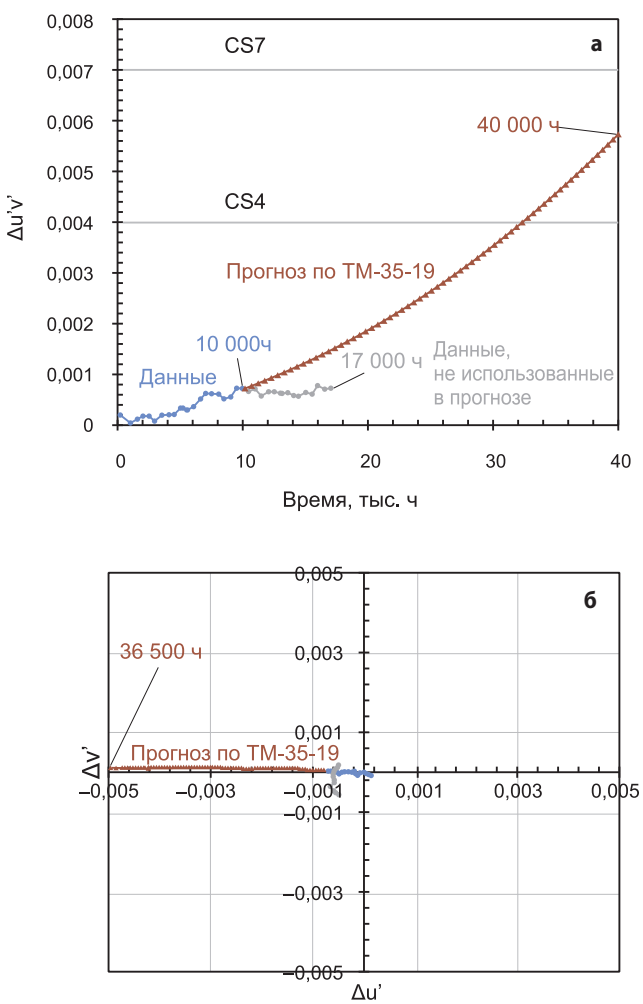


Рис. 9. Экспериментальные данные и прогноз по TM-35-19 для светодиодов в полимерных корпусах, работающих при температуре +85 °C и 150 мА: а) сдвиг цветности; б) направление сдвига цветности. Первые 10 000 ч данных (синие точки) были использованы в прогнозе по TM-85–19 (красные точки), дополнительные данные показаны серым цветом

Исследование 6. CSP-светодиоды

В заключительном исследовании оценивались CSP-светодиоды, испытанные в течение 17 000 ч в различных условиях — +85 °C (синяя кривая) и +105 °C (фиолетовая кривая) при 1050 мА, как показано на рис. 11. После 17 000 ч испытаний при температуре +105 °C светодиод находился в фазе «рост», но при +85 °C — не достиг этой фазы. Описанное различие в фазах привело к тому, что модель TM-35 предсказала различный сдвиг цветности. До фазы роста CSP-светодиод демонстрирует сдвиг в желтую область, а после перехода в фазу роста направление сдвига с желтого меняется на синее.

Ключевые выводы: прогноз для Δu'v' консервативен (удовлетворяет критерию 1), но существует некоторая неопределенность относительно направления прогнозируемого сдвига цветности (не соответствует критерию 2). Модель, вероятно, переоценила изменение Δu' при температуре +105 °C, что приводит к сдвигу цветности в сторону пурпурного вместо синего.

Заключение

Методология TM-85-19 для прогнозирования сдвига цветности оценена для четырех основных типов светодиодов в шести

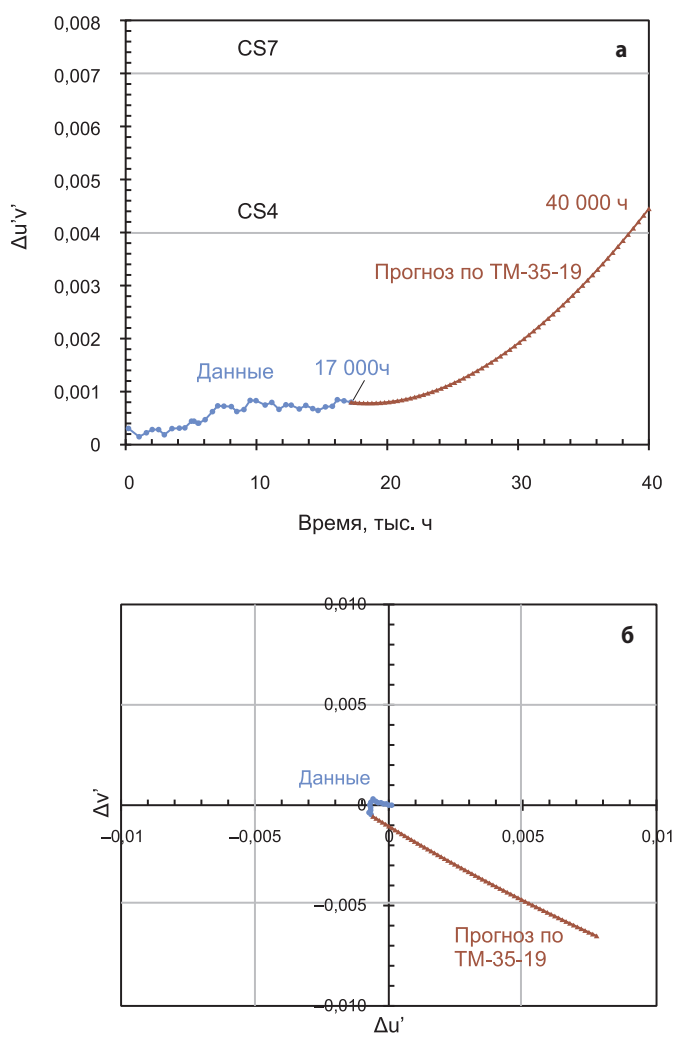


Рис. 10. Экспериментальные данные и прогноз по TM-5-19 для светодиодов в полимерных корпусах, работающих при температуре +85 °C и токе 150 мА: а) сдвиг цветности; б) направление сдвига цветности. Все 17 000 ч данных (синие точки) были использованы в прогнозе по TM-85-19 (красные точки)

исследованиях с использованием наборов данных LM-80-15, предоставленных несколькими ведущими производителями светодиодов. Модель представляет собой консервативный прогноз значений Δu'v' светодиодных модулей (прогнозируемое время CSx, как правило, меньше, чем фактическое). В частности, модель работает лучше всего, когда имеет место фаза роста и есть хотя бы некоторые данные, указывающие на то, что эта фаза наступила.

Эта модель, по-видимому, не может точно предсказать направление сдвига цветности. Предсказываемые координаты цветности часто не согласуются с известными механизмами деградации оцениваемых типов светодиодов.

Имеет место высокая чувствительность точности прогноза к интервалу измерений, выбранному при испытаниях по LM-80. Это представляет потенциальную проблему, поскольку на прогноз цветности может существенно повлиять информация, предоставленная производителем светодиодов в LM-80-15. Однако при понимании ограничений такая модель может оказаться полезной для светотехнической отрасли. ●

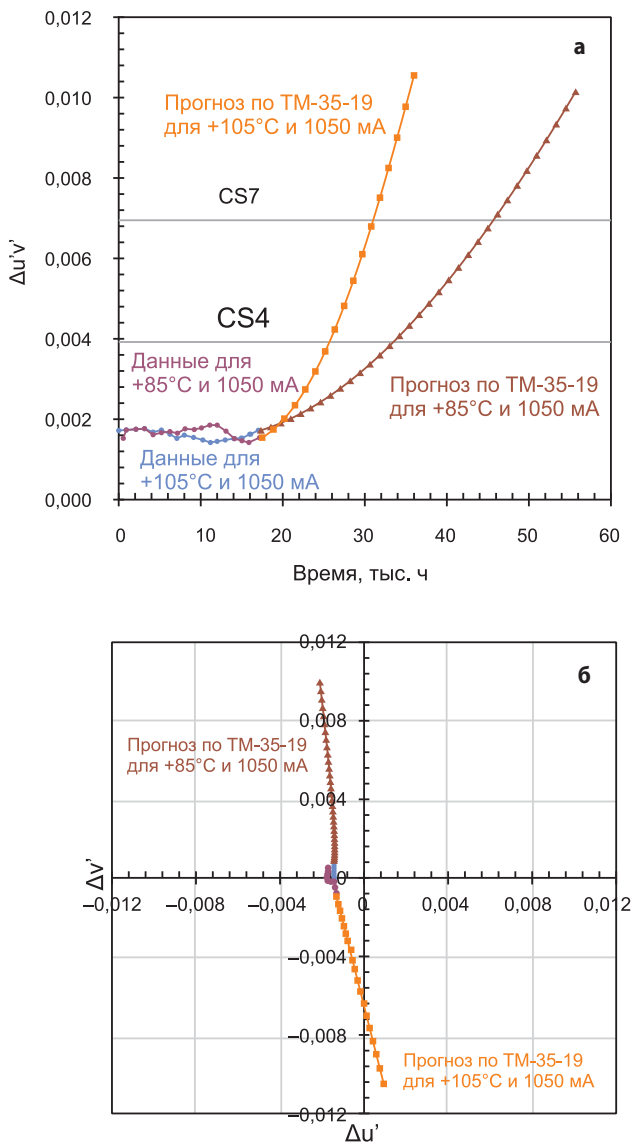


Рис. 11. Экспериментальные данные и прогноз по TM-35-19 для идентичных наборов одинаковых CSP-светодиодов, работающих при двух различных условиях: а) сдвиг цветности; б) прогнозируемое направление сдвига цветности для 17 000 ч измеренных данных при +85 и +105 °C

Оригинал статьи опубликован в журнале LED Professional, ноябрь-декабрь 2020.

Литература

1. Illuminating Engineering Society. IES LW-80-08 Approved Method: Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources. New York, 2008.
2. Illuminating Engineering Society. IES TM-21-11, Projecting Long Term Lumen Maintenance (of LED Light Sources. New York, 2011.
3. American National Standards Institute and Illuminating Engineering Society. ANSI/IES LM-80-15 Approved Method: Measuring Luminous Flux and Color Maintenance of LED Packages, Arrays and Modules. New York, 2015.
4. American National Standards Institute and Illuminating Engineering Society. IES TM-35-19, Technical Memorandum: Projecting Long-Term Chromaticity Coordinate Shift of LED Packages, Arrays, and Modules. New York, 2019.
5. Hansen M. Package Impact on Color Shit in LEDs. Презентация на конференции Strategies in Light Conference. Santa Clara, CA, 2016.
6. Davis L., Hansen M. Lumen and Chromaticity Maintenance Behavior of Light Emitting Diode (LED) Packages Based on LM-80 Data. U.S. Department of Energy. Washington, D.C, 2020.