

# Измерительная лаборатория для комплексного исследования характеристик светодиодов, применяемых в системах отображения информации

Сергей НИКИФОРОВ,  
к. т. н.

## Введение

Результатом интенсивного развития технологий в области производства оптоэлектронных приборов на основе полупроводниковых светоизлучающих кристаллов стало широкое использование этих приборов в системах отображения информации, а также в световой сигнализации, декоративной подсветке и освещении. Большой выбор цветов свечения, комбинация мощного излучения с любой формой пространственного распределения и получения любого оттенка цвета в широком динамическом диапазоне световых потоков открывают огромные перспективы использования светоизлучающих диодов в качестве источников света для этих устройств. Однако проектирование и разработка конструкций указанных устройств, а также новых типов светоизлучающих диодов невозможна без подробного анализа характеристик источников излучения. Предложенный в этой статье измерительный комплекс позволяет получать и исследовать практически все существующие фотометрические, спектральные, электрические, энергетические и другие необходимые для подобных работ параметры, зависимости и характеристики светодиодов и излучающих структур. Он также имеет возможность реализации научных программ по исследованию физических свойств излучающих кристаллов, разработки технологии производства светоизлучающих диодов на их основе и экспериментов по изучению механизмов деградации параметров со временем наработки.

Несмотря на отсутствие должной нормативной базы по метрологии светотехнических характеристик светодиодов, работа над

которой ведется Международной Комиссией по Освещению (МКО), все измерения основаны на публикациях [1, 2, 6] и дополнены собственными методиками, разработанными непосредственно для измерений и расчетов некоторых необходимых величин [3].

Разработка совершенных методик по тестированию и отбраковке, прогнозу качества и анализу потенциальной надежности светодиодов, оценка заявленных производителем характеристик, оценка реальных, а не декларируемых параметров на работающих изделиях — задача важная для множества областей, где сегодня применяются светодиоды. Однако область, где точно определение параметров светодиодов оказывается критически важной, — это производство светодинамических конструкций и экранов больших размеров.

## Почему это нужно?

Давний опыт использования светодиодов в больших полноцветных экранах, а также детальное знакомство с проблемами и трудностями использования привели разработчиков и специалистов к мысли о создании многофункциональной фотометрической лаборатории для исследования параметров светодиодов. Существующий в обычной практике подход к выбору, аттестации и исследованию параметров светодиодов оказался неэффективным при создании таких сложных и высокоточных изделий, как полноцветные экраны. Прецизионной точности сортировка светодиодов по параметрам, глубокий анализ изменения характеристик со временем наработки и измерения величин по оригинальным методикам — вот неполный перечень необходимых

мер для построения высококачественного устройства отображения информации.

Подобные мероприятия, проводимые в цикле производства своей продукции, позволяют получать необходимый уровень качества и стабильности характеристик экранов, а также спрогнозировать поведение тех или иных параметров при длительной эксплуатации экрана. В сумме все это позволяет проектировать устройства, имеющие оптимальное соотношение цены и качества и легко обеспечивать необходимые параметры экранов для конкретных заказчиков, сохраняя качество.

Так, например, одно из последних изделий — большой информационный экран, расположенный на ТРЦ «Смоленский Пассаж» (г. Москва) — имеет высокое соотношение люмен на ватт потребленной экраном электрической мощности (приблизительно 25 лм/Вт), что может свидетельствовать об оптимальности использования светотехнических ресурсов светодиодов и максимально возможном соотношении цены, качества, эффективности и энергосбережения.

В мировой практике строительства больших светодиодных экранов найдется не так много установок с такими оптимальными характеристиками. Данный результат — не случайность, а доказательство важной роли научной составляющей в построении современных высокотехнологичных электронных устройств.

## Назначение

По функциональному использованию все оборудование для эксперимента делится на 3 части. Одну группу составляют средства

измерения и регистрации различных величин, устройства преобразования их сигналов (АЦП, периферийные устройства), высокоточные источники питания, электромеханические установки и вспомогательные приборы. Эта группа представляет собой фотометрический стенд. Вторая часть оборудования представлена аналитическим центром на базе компьютера. Последняя группа оборудования предназначена для реализации необходимых режимов во время наработки образцов и представлена устройствами обеспечения стабилизированного питания и температурного режима работы светодиодов.

Концепция большинства экспериментов и программ предполагает изучение максимально возможного количества параметров светодиодов, а их измерение является одной из самых ответственных частей. Поэтому подход к разработке и созданию измерительного комплекса был направлен на интеграцию измерений различных величин с одной стороны и на универсальность такого комплекса без потери метрологических характеристик по отношению к большому динамическому диапазону и типам исследуемых источников с другой. Для осуществления данной программы было специально разработано и изготовлено большинство электронных устройств, механических систем и средств измерения. Наряду с этим, в рамках соблюдения федерального закона «Об обеспечении единства измерений» и для корректности выполняемых исследований, с точки зрения соответствия метрологических характеристик эталонным величинам, основные средства измерения были внесены в Государственный реестр средств измерений и подверглись проверке в соответствии с утвержденной методикой и Государственной поверочной схемой, регламентируемой ГОСТ 8.023-90 «Государственная поверочная схема для средств измерений световых величин непрерывного и импульсного излучений». Проверка осуществляется на эталонной базе Всероссийского научно-исследовательского института оптико-физических измерений (ВНИИОФИ), держателя Государственного первичного эталона единицы силы света — кандели.

#### Фотометрический стенд

Вся установка располагается в отдельном помещении, особой конфигурации и специальной отделки. Поскольку измерения фотометрических величин ведутся в непрерывном режиме (что верно с точки зрения физики процесса измерения) без использования модуляции излучения, детектирования и усреднения импульсов фототока по времени, при котором нельзя проводить измерения непосредственно при внешнем освещении, очень важным требованием к данному помещению будет полное отсутствие посторонних засветок. Другим, не менее важным требованием будет обеспечение необходимого расстояния фотометрирования для выпол-

нения закона «обратных квадратов» при измерении энергетических величин излучения. Исходя из указанных условий было создано помещение, представляющее собой расширяющийся с одной стороны коридор, все стены, пол и потолок которого обшиты черной тканью, поглощающей свет. Данная конфигурация помещения лаборатории продиктована ГОСТ Р 51000.4-96 [4] и соответствует ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2000 [5] для использования в качестве составной части прецизионного фотометрического стенда, средства измерения которого имеют статус рабочего эталона и занесены в Государственный реестр СИ.

Размеры коридора обеспечивают измерительную базу (расстояние от источника излучения до фотометра) до 11 м. Для выполнения измерений небольших световых величин (до 10–30 кд) был изготовлен специальный стол, на котором располагается массивный оптический рельс, позволяющий изменять расстояние фотометрирования в пределах 0,1–2,5 м. Большинство средств измерения также располагаются на этом столе в непосредственной близости от двухкоординатного гониометра, жестко связанного с поверхностью стола. Гониометр съюстирован с двумя фотометрами, первый из которых расположен на рейтере, перемещаемом по рельсу, а второй — в конце коридора. Гониометр был разработан и изготовлен специально для этой лаборатории и имеет возможность подсоединения к цепям питания и закрепления на своей поворотной части источников излучения любой конфигурации размером до 0,6×0,6 м и весом до 20 кг (для возможности измерения светотехнических характеристик устройств на основе светодиодов: модулей, ламп, светоблоков, светодиффузоров и т. д., имеющих большую массу и размеры). Для исключения влияния механических вибраций, вызываемых угловым перемещением гониометра во время измерения и передаваемых стенду от пола здания, стол имеет значительную (около 500 кг) массу и особый постамент, регулируемый по высоте для юстировки.

Блок-схема и общий вид фотометрического стенда представлены на рис. 2. Фотометр 1 выполнен на основе фотометрической головки типа ГФ-38, разработанной с применением кремниевого фотодиода типа ФД 228 (прошедшего процесс старения для стабилизации параметров), скорректированной под функцию видности глаза  $V(\lambda)$  не хуже  $F' = 5\%$ , где  $F'$  — есть отличие от единицы поправочного коэффициента физического фотометра  $K_s$ . Расчет  $K_s$  позволяет исключить систематическую составляющую погрешности измерений, связанную с переходом от источника типа «А» (калибровка эталонной фотометрической головки) к спектру излучения светодиода. Поправочный коэффициент рассчитывается для каждого измерения светодиода, если был изменен его электрический или иной режим. Погрешность нелинейнос-

ти фотометрической головки — не более 3% (рис. 3).

Для устранения возникновения возможных помех в тракте передачи малых значений фототока от фотометра непосредственно за ним, на расстоянии не более нескольких сантиметров расположен блок с усилителем сигнала и АЦП. Выходной сигнал с фотометра на регистратор значений передается в цифровом виде. Это обеспечивает высокую помехозащищенность и достоверность передачи информации от фотометрической головки на всем расстоянии фотометрирования, которое, как говорилось, может составлять до 11 м. Это обстоятельство позволяет измерять очень малые значения световых величин без искажения при передаче, что существенно расширяет динамический диапазон стенда.

Площадь активного окна фотометра составляет 100 мм<sup>2</sup>. Это соответствует требованиям МКО [1] (также в [1] предписывается пользоваться двумя стандартными значениями расстояния фотометрирования — 100 и 316 мм), однако довольно стабильная тенденция существенного увеличения силы света светодиодов тяготеет к применению фотометров с меньшей площадью активного окна и большим расстоянием фотометрирования. В таком случае меньшая площадь апертуры фотометра позволяет наиболее точно измерять диаграмму пространственного распределения силы света по причине малого дискрета угла поворота гониометра (0,025° или 1,5 угловые минуты), и поэтому вероятности пересечения световых потоков соседних точек, интегрированных фотометром с большой площадью, будут минимальны [3]. Это значительно повышает точность измерения диаграмм пространственного распределения излучения. В практике измерений характеристик источников света в лаборатории применяются как методики собственной разработки, так и их комбинации с существующими. На рис. 1 представлены блок-схема и общий вид фотометра.

Гониометр 2 имеет датчик угла поворота в горизонтальной плоскости (на рис. 2 — «Н»), способный регистрировать угловое перемещение гониометра вместе с закрепленным на нем излучателем (светодиодом) в раз- мере 6 угловых минут. Так же в виде цифрового кода информация с датчика передается в блок регистрации значений 6, где каждому дискрету угла  $\Omega_i$  присваивается свое значение силы света  $I_{v,i}$ , информация о котором, соответственно, поступает с АЦП фотометра. Регистратор значений автоматически определяет шкалу значений фототока, в пределах которой будет проходить измерение. Далее вся обработанная последовательность передается в компьютер через скоростной USB-порт в виде таблиц со значениями углов поворота и соответствующими им значениями силы света. Синхронизация работы системы осуществляется от тактовой частоты компьютера с помощью специально разра-

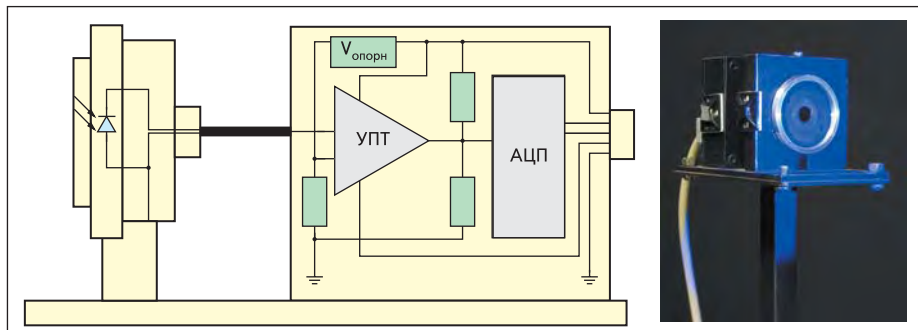
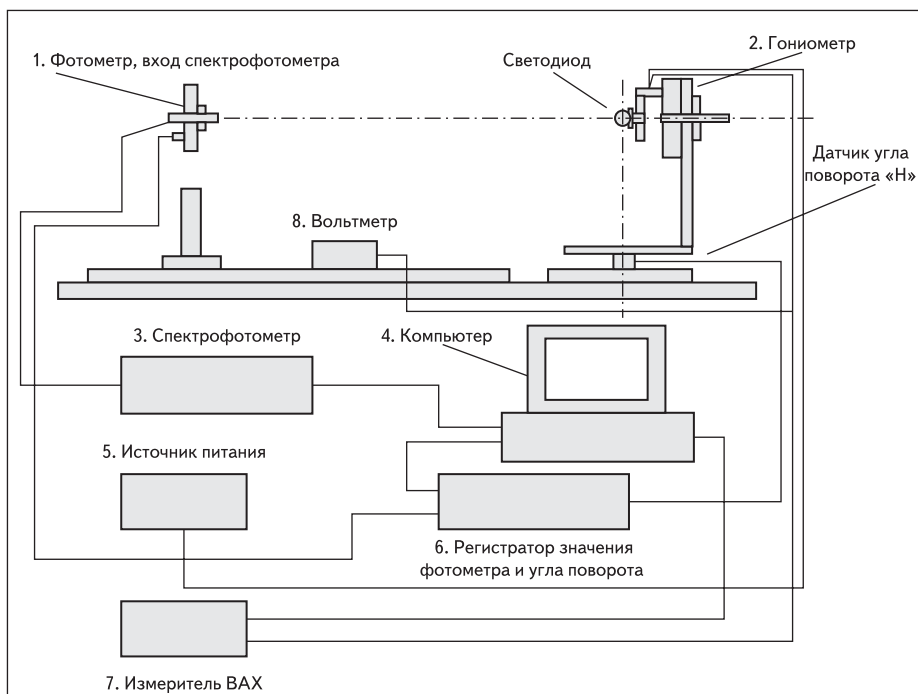


Рис. 1. Блок-схема и общий вид фотометра



7. Измеритель VAX



Рис. 2. Блок-схема и общий вид фотометрического стенда

ботанного программного обеспечения. Скорость регистрации указанных параметров позволяет измерить диаграмму простран-

ственно излучения силы света во всей плоскости (поворот на угол  $360^\circ$ ) с фиксацией 14 400 точек дискретов (значений силы света) за 1–2

секунды. При этом возможно многократное повторение поворотов гониометра и автоматическое вычисление среднего значения силы света в каждой точке, независимо от числа проходов фотометра через нее. С помощью комбинаций поворотов в двух плоскостях закрепленного на гониометре светодиода можно получить диаграммы направленности излучения в любой плоскости, в пределе получив объемный вид этой диаграммы и, соответственно, распределение плотности светового потока в 4л ср.

Закрепление отдельного светодиода на гониометре и позиционирование его относительно осей измерительной системы осуществляется с помощью крепящейся к передней плоскости поворотной системы специальной платы (рис. 4) с точно размещенными в центре миниатюрными цанговыми разъемами для светодиода. В верхней части платы находится разъем, с помощью которого подсоединяется питание от источника 5, а также измерительные выводы фиксатора VAX 7 и вольтметра 8.

Описанный гониометр используется и для измерения фотометрических характеристик готовых модулей — структурных единиц экранов и табло. В этом случае при помощи специальной оснастки вместо отдельного светодиода на гониометре закрепляется измеряемый модуль. При этом все метрологические характеристики стенда полностью сохраняются, и теперь уже параметры распределения излучения модуля могут быть измерены в любой плоскости наблюдения. Одновременно с получением диаграмм пространственного распределения излучения возможно измерение яркости и координат цветности модуля с помощью фотоколориметра Minolta CS 100A, который имеет коррекцию оптической части под «стандартного наблюдателя МКО» с углом зрения в  $1^\circ$ . Сопоставление этих измерений позволяет с высокой точностью оценить фотометрические характеристики экрана, построенного на основе измеряемого модуля, и рационально спроектировать местоположение будущего устройства отображения информации непосредственно на месте установки с целью оптимального восприятия наблюдателем информации, воспроизводимой на нем.

Прецизионный источник тока 5 (рис. 5) имеет 3 идентичных канала с цифровой настройкой значения выходного тока отдельно в каждом канале в пределах 0–100 мА. Точность установления тока — 1 мА (100 дискретов), точность поддержания заданного значения —  $\pm 5\%$ . 3 канала в некоторых случаях необходимы для измерения полноцветного (трехкристального) светодиода и удобства формирования любого оттенка с помощью изменения тока питания. На табло источника индицируется как установленное, так и фактическое значение тока каждого канала. Источник тока имеет выходное напряжение до 15 В, поэтому несоответствие фактическо-



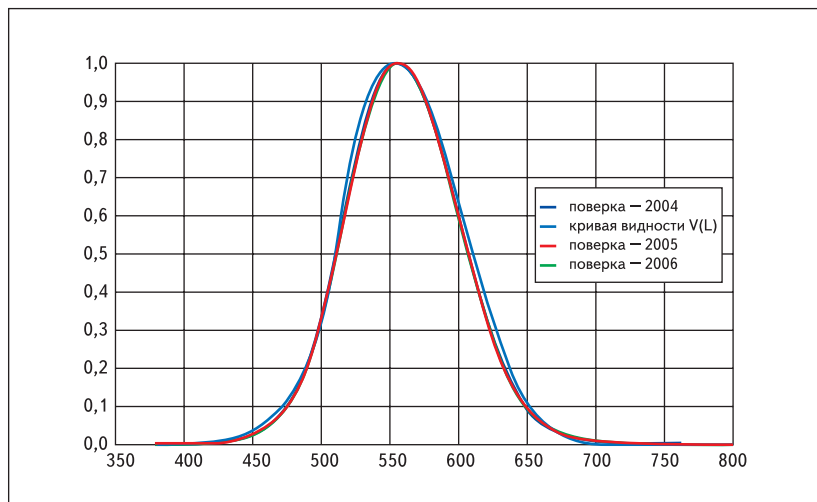


Рис. 3. Спектральная чувствительность фотометра, ее положение относительно функции  $V(\lambda)$  и динамика ухода характеристики по результатам поверок

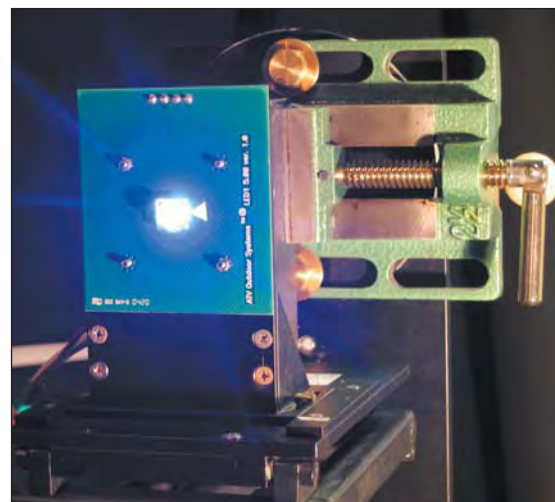


Рис. 4. Верхняя часть гониометра с поворотным устройством второй плоскости, место крепления и подсоединения разъема питания

го тока установленному означает значительное нарушение хода ВАХ светодиода или нарушение контактных соединений. Проверка данного параметра позволяет избежать неправильных измерений световых величин из-за неправильного электрического режима. Кроме того, источник тока дает возможность вручную измерять ЛАХ (люмен-амперную характеристику)  $\Phi(I_f)$  при соответствующем последовательном измерении углового распределения силы света  $I_v(\Omega)$ , зависимость  $I_v(I_f)$  или спектральное распределение излучения  $\Phi_e(\lambda)$  как функцию от  $I_f$ .

С помощью вольтметра 8, имеющего 6 разрядов обработки входного сигнала, можно с высокой точностью фиксировать  $U_f$  в момент измерения фотометрических характеристик. Однако все указанные функции можно реализовать с помощью измерителя ВАХ 7 (рис. 6) с возможностью работы в автоматическом режиме.

Измеритель ВАХ был разработан с учетом возможности измерений подавляющего большинства электрических характеристик светодиодов. Он тоже представляет собой программно управляемый источник тока с калиброванными значениями. Весь диапазон рабочих токов до 100 мА разбит на 2 поддиапазона: 0–10 мА с возможностью установки мини-

мального дискрета тока 0,01 мА (1000 точек) для более точного измерения экспоненциального участка ВАХ светодиодов и 0–100 мА с возможностью установки минимального дискрета тока 0,1 мА (1000 точек). Прямое падение напряжения на измеряемом приборе по отдельной линии подается на компаратор сигнала и впоследствии поступает на АЦП. Быстродействие ограничено необходимым временем на формирование импульса заданного значения тока, фиксации аналогового напряжения на нагрузке, его оцифровки и передачи в компьютер в режиме реального времени.

Также предусмотрена возможность изменения времени измерения между дискретами в диапазоне 20 мс — 30 мин для реализации режимов импульсного и разогревающего действия тока. Эта функция имеет 2 режима: независимо от установленного времени между измерениями можно задавать любое значение тока в паузе между этими измерениями, тем самым устанавливая необходимую степень теплового действия тока или моделируя различные электрические режимы работы светодиода в реальных условиях. Измерение ВАХ обратной ветви обеспечивается подачей на светодиод обратного смещения до –20 В. Однако здесь алгоритм работы уст-

ройства меняется на противоположный, и заданным значениям обратного напряжения  $U_r$  будут присваиваться соответствующие значения обратного тока  $I_r$  в диапазоне до –500 мА. Обработка результатов измерения производится по аналогичному принципу, описанному для прямой ветви ВАХ. Обратное напряжение  $U_r$  можно устанавливать с точностью до 0,1 В. Всю последовательность измерений и установку необходимых значений обеспечивает программное обеспечение, также разработанное для совместной работы с измерителем ВАХ. Реализация указанных электрических режимов светодиодов этим устройством во всей полноте используется и при измерении светотехнических характеристик. Для этого разъем на плате гониометра, на которую устанавливается светодиод, имеет совместимую с разъемом источника питания распайку, поэтому достаточно переключить эти разъемы, и программная установка электрических режимов с помощью измерителя ВАХ одновременно будет соотнесена со светотехническими характеристиками светодиода. Особенно удобно пользоваться таким сочетанием, когда необходимо достаточно точно измерять ЛАХ —  $\Phi(I_f)$ : время установления термодинамического равновесия работающего светодиода задает-



Рис. 5. Источник тока для питания светодиодов

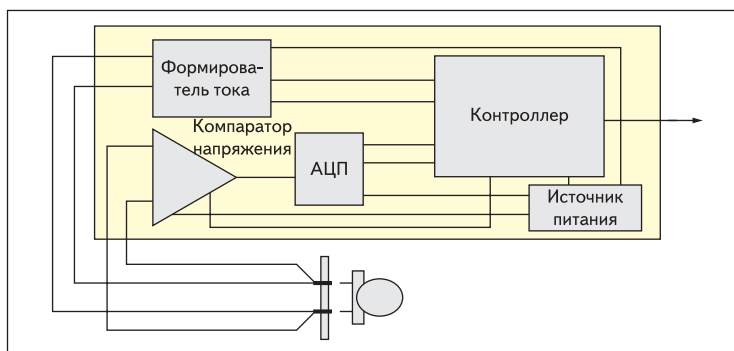


Рис. 6. Блок-схема измерителя ВАХ

ся программой, а фотометр фиксирует значение силы света через это время.

Для измерений спектрального распределения энергии излучения  $\Phi_e(\lambda)$  использовался спектрофотометр 3. Излучение от светодиода передается на его измерительную часть с помощью оптоволоконного световода с известной передаточной характеристикой, которая учитывается при расчетах параметров спектра. Входная часть световода располагается непосредственно на корпусе фотометра, и фактически они оба получают часть излучения от источника, исходящего из одной его точки. Поэтому можно считать, что светотехнические параметры, зафиксированные фотометром в данной точке диаграммы пространственного распределения, и колориметрические, зафиксированные спектрофотометром, характеризуют излучение одной этой точки.

И, хотя функция  $\Phi_e(\lambda)$  имеет достаточно малое отклонение в зависимости от угла излучения светодиода с одним кристаллом, на краях функции чувствительности фотоприемника (коротковолновый синий и длинноволновый красный, где ошибка максимальна — рис. 3), это отклонение может повлиять на изменение коэффициента преобразования фотометра (значение которого в таком случае необходимо рассчитать заново), и, как следствие, на достоверность результата измерения, не говоря уже о том, что только такое расположение входа спектрофотометра может обеспечить измерение функций  $\lambda_{dom}(\Omega)$ ,  $P(\Omega)$  при измерении светодиодов с несколькими кристаллами (например RGB). Примененный спектрофотометр обеспечивает измерения функции  $\Phi_e(\lambda)$  в диапазоне 190–1100 нм с шагом измерения 0,25 нм при разложении всего диапазона приблизительно на 4000 точек.

#### Аналитическая часть

Вся информация об измерениях, полученных данных для расчета всех необходимых характеристик и зависимостей сосредоточена в аналитической части всей измерительной установки эксперимента — компьютере. Расчет светотехнических, колориметрических и других величин и характеристик производился с применением разработанных непосредственно для этих целей программ, составленных в пакетах MathCAD, Excel последних версий. Особенностью этого компьютера является высокое быстродействие, значительный объем памяти и наличие современной подсистемы обработки изображений и построения графиков. Данное условие проистекает из расчета количества измерений и скорости их обработки. К аналитической части также стоит отнести различного рода измерительные приборы, осуществляющие постоянный мониторинг состояния окружающей среды в помещении, где располагается стенд. Это барометр, гигрометр и термометр с возможностью измерения температуры в нескольких точках стенда. Все по-

казания этих приборов также учитываются при расчетах, так как имеются зависимости показаний основных средств измерения стенда от условий окружающей среды.

#### Оборудование для обеспечения необходимых режимов работы светодиодов во время наработки при изучении механизмов деградации

В процессе наработки одним из самых важных условий является поддержание стабильности режимов работы светодиодов. Прежде всего, это жесткая стабилизация тока питания светодиодов, постоянство значения которого не должно вызывать сомнения на протяжении всего срока наработки. Любое отклонение от этого условия сведет на нет все измерения из-за достаточно высокой вероятности существенного влияния плотности протекающего тока на деградационные характеристики. Даже незначительное, но длительное изменение питающего тока или разные его значения для различных образцов могут повлиять на дальнейшее принятие решения о той или иной причине изменения любого параметра, что приведет к неправильным выводам. Кроме того, важен факт постоянства пребывания светодиодов в рабочем состоянии, по возможности с минимальным количеством коммутационных циклов, которые обязательно внесут свой вклад в деградацию параметров. Полностью избавиться от этого эффекта не удастся (необходимо отключать светодиоды на время измерения), однако свести к минимуму возможно. Исходя из этого, была разработана особая система питания светодиодов, исключающая возможность появления подобных проблем.

Для каждого из исследуемых образцов индивидуально применяется двухступенчатая схема стабилизации: по напряжению и по току. Для решения обозначенной задачи нельзя применять ни групповую, ни какую-либо иную систему стабилизации — появление группы приборов, непосредственно связанных по цепи питания, неизбежно приведет к их взаимному влиянию друг на друга при изменении параметров в процессе наработки, как следствие реакции источника питания на эти изменения в соответствии с законом Кирхгофа. Ввиду большой крутизны вольт-амперной характеристики изменение напряжения питания всего на 0,05 В приведет к изменению потребляемой мощности приблизительно на 2% и в такой же пропорции изменит тепловой режим светодиода, что не может не сказаться на его параметрах при длительной работе.

Система питания (рис. 7) представляет собой мощный импульсный источник стабилизированного напряжения, питающий несколько плат со светодиодами. Этот источник имеет обратную связь по напряжению, с помощью сигнала рассогласования которой он поддерживает выходное напряжение непосредственно на нагрузке, компенсируя тем самым влияние проводов и падение напряжения на контактах разъемов. Платы, на которых расположены светодиоды и их стабилизаторы тока, подсоединены к этому источнику общей шиной. Каждый светодиод имеет свой собственный стабилизатор тока, поддерживающий только его режим. Для удобства и оперативности установки и извлечения светодиодов с плат на них установлены цанговые контактные гнезда. Схема составлена таким образом, что примененный стабилизатор на-

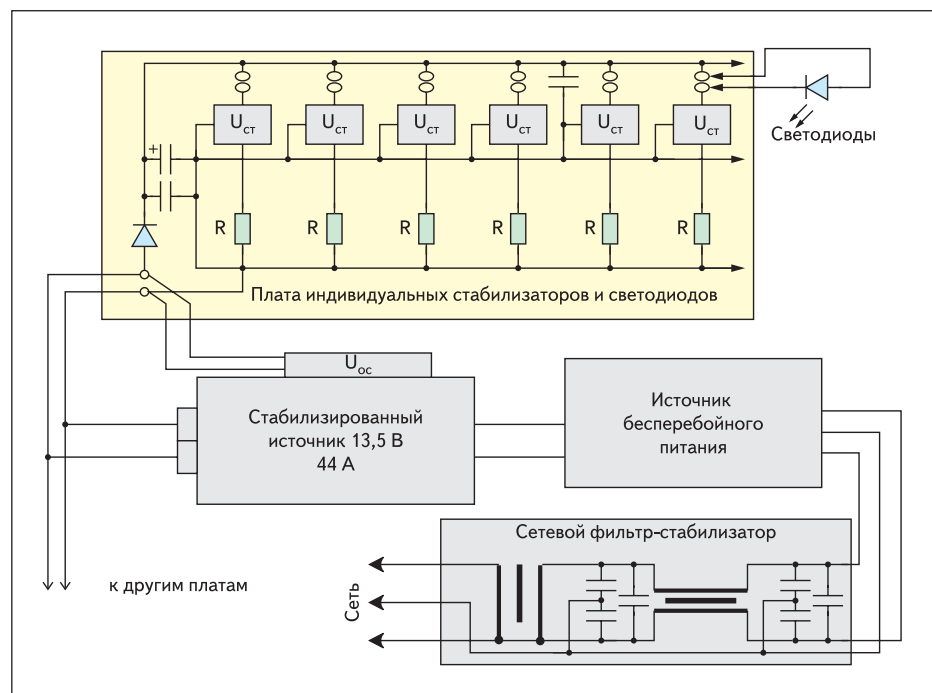


Рис. 7. Блок-схема системы питания светодиодов для режима наработки

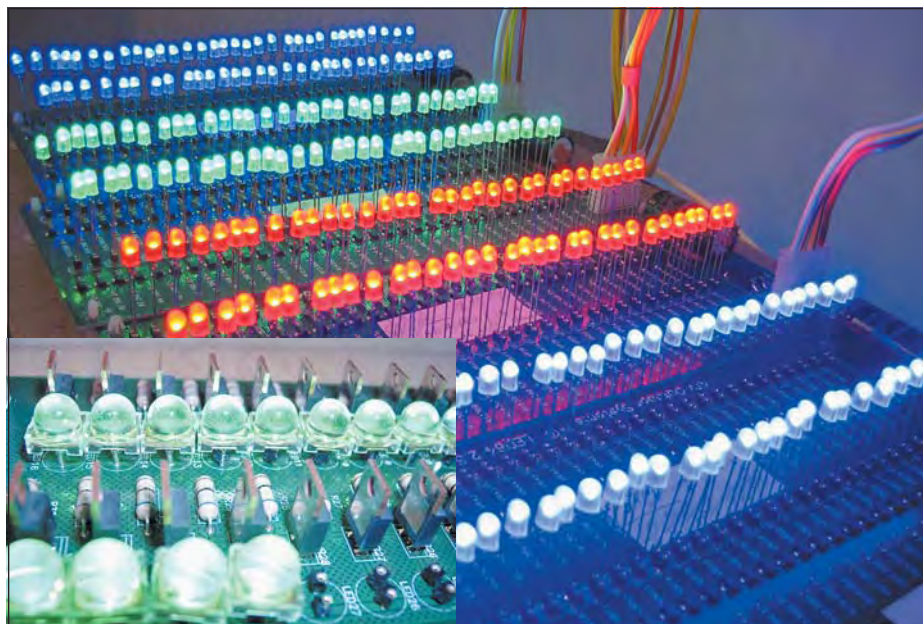


Рис. 8. Платы со стабилизаторами и установленные в них светодиоды в процессе наработки

пряжения известного номинала работает на резистор, который задает ток в цепи между стабилизатором и источником напряжения. Поэтому стабилизатор напряжения работает в своем штатном включении. Светодиод включается в разрыв входа питания стабилизатора, замыкая собой всю цепь. Поддерживая постоянство напряжения на резисторе, сопротивление которого не изменяется, стабилизатор тем самым поддерживает постоянство тока через всю цепь вместе со светодиодом. Напряжение питания плат выбрано из расчета:

$$U = U_f + U_{st} + \Delta U + U_d, \quad (1)$$

где  $U_f = 5,5$  В при  $I_f = 100$  мА (возможна наработка при таких токах через светодиод),  $U_{st} = 5$  В — напряжение стабилизации стабилизатора,  $\Delta U = 2,5$  В — минимальное падение напряжения на стабилизаторе,  $U_d = 0,3$  В — падение напряжения на входном диоде. При отсутствии светодиода в гнезде соответствующего стабилизатора последний оказывается обесточенным, при этом остальные могут работать. Стоит отметить, что такое включение светодиода оправдано еще и тем, что при любом катастрофическом отказе стабилизатора светодиод не окажется включенным в цепь с повышенным неконтролируемым напряжением и не выйдет из строя. Также каждая плата с группой светодиодов (рис. 8) имеет свои фильтры, выполненные на электролитическом конденсаторе большой емкости (10 000 мкФ) и нескольких керамических, равномерно распределенных по площади платы. Входной диод защищает всю плату от напряжения обратной полярности.

Весь комплекс питается от сетевого стабилизатора — фильтра, предохраняющего по-

следующие устройства от колебаний сетевого напряжения и обеспечивающего еще одну ступень стабилизации. Также, в цепь питания источника напряжения введен источник бесперебойного питания на случай отключений сетевого напряжения.

#### Заключение

Лаборатория для разработчика светодиодных экранов является важным звеном производственной цепочки. От результатов лабораторных исследований зависит выбор того или иного производителя светодиодов, определение параметров и долговечности будущей продукции. Лаборатория является центром научных разработок новой продукции и полигоном при создании новейших методик для изучения и тестирования всей линейки светотехнической аппаратуры.

#### Литература

1. Technical report "Measurement of LED's" CIE127-1997. ISBN 3 900 734 84 4 (Технический доклад МКО «Измерения СИД»).
2. Котюк А. Ф. Основы оптической радиометрии. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2003.
3. Никифоров С. Г. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? // Компоненты и технологии. 2005. № 7.
4. ГОСТ Р 51000.4-96. Система аккредитации в РФ. «Общие требования к аккредитации испытательных лабораторий». Госстандарт РФ, официальная копия документа № 036.637.
5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2000. «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».
6. Айзеберг Ю. Б. Справочная книга по светотехнике. М.: Энергоатомиздат. 1995.