УДК 621.3 DOI: 10.18698/2541-8009-2017-12-221

МАКЕТ РОБОТА-ТЕСТЕРА ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СВЕТОДИОДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

О.И. Дмитриев doleg1999@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Разработан и сконструирован прототип робота для автоматизированного тестирования электронных компонентов, в частности светодиодов и светодиодных матриц. Установка предназначена для работы в составе автоматической производственной линии и отвечает всем метрологическим требованиям. Отличительными особенностями данной конструкции являются компактность и дешевизна. Подробно описана технология тестирования светодиодов. Представлены все узлы и сенсоры робота, приведен алгоритм отработки программно-аппаратного комплекса. Полученные результаты проанализированы и представлены перспективы дальнейшего развития технологии путем внедрения элементов машинного зрения.

Ключевые слова

Автоматизированный процесс, робот-тестер, элементы машинного зрения, светодиод, 3D-принтер

Поступила в редакцию 10.10.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Производство светодиодов — сложный процесс, состоящий из нескольких этапов, самым важным из которых является тестирование светодиодного кристалла. В отечественном производстве светодиодов наблюдается огромный дефицит оборудования для автоматизированного тестирования светодиодных компонентов, и тестирование светодиодных кристаллов проводится вручную большим количеством высококвалифицированных работников. Тестирование светодиодов посредством ручного труда занимает много времени, тормозит производство и создает постоянные дополнительные расходы, связанные с работой коллектива и влияющие на себестоимость кристалла. Необходимо создать макет робота-тестера для автоматизации процесса тестирования светодиодных кристаллов, светодиодов и светодиодных матриц.

Светодиодные источники света — это самые эффективные источники преобразования электромагнитной энергии в световую. На сегодняшний день КПД светодиодов может составлять 65 % (КПД лампы накаливания 7 %), срок службы светодиодных источников составляет 70–100 тыс. ч. непрерывного свечения. Светодиодные источники света экологически безопасны и при равных световых потоках потребляют в 10–15 раз меньше электроэнергии, чем традиционные источники освещения (лампы накаливания, люминесцентные лампы). Светодиоды превосходят традиционные источники света по всем светотехническим и оптическим параметрам, но вместе с этим затраты на производство светодиодов значительно превышают таковые на изготовление традиционных источни-

ков света [1]. Поскольку сегодня на мировом рынке полупроводниковой продукции растет спрос на светодиодные источники света, то уменьшение их себестоимости становится актуальным.

Строение и этапы производства светодиода. Все этапы производства светодиода выполняются последовательно соответствующими роботами, находящимися на одном конвейерном потоке. Основным элементом светодиода является светоизлучающий кристалл, смонтированный на алюминиевой или медной подложке (рис. 1). Светодиодный кристалл состоит из активного *p*-полупроводникового слоя, в состав которого входят GaN и Mg, активного *n*-полупроводникового слоя, состоящего из GaN и Si (рис. 2). От каждого из этих слоев сделаны выводные *p*- и *n*-контакты, находящиеся на поверхности распределения тока, в состав которой входят Ni или Au. На границе раздела *p* и *n* слоев находится активная прослойка вещества InGaN. Внизу кристалла расположена «подложка», изготовленная из SiC или Al_2O_3. Корпус нужен для защиты внутренних составляющих светодиода от механических воздействий со стороны окружающей среды. Для того чтобы пустить через кристалл электрический ток к *p*- и *n*-контактам припаяны выводы, называемые катодом и анодом. Силиконовый гель, заполняющий пространство между кристаллом и пластиковой линзой, служит для оптимизации коэффициента преломления. Пластиковая линза в светодиоде используется для улучшения его оптических характеристик, она собирает пучок лучей и делает излучение менее рассеянным.

Рис. 1. Строение светодиода

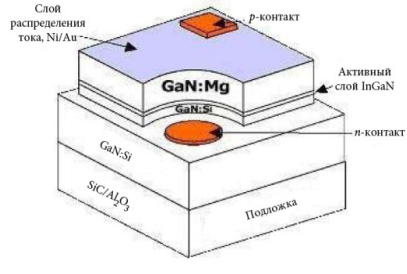


Рис. 2. Строение светоизлучающего кристалла

Создание светодиода состоит из нескольких этапов (I–VII). Изготовление полупроводниковой пластины (рис. 3) методом газовой эпитаксии.

Первоначально осуществляют напыление тонких пленок индия и нитрида галлия на карбид-кремниевую подложку (см. рис. 2). Пропорция и состав напыляемых веществ на нее влияют на характеристики будущего светодиода (энергию светового потока, цвет, доминантную длину волны излучения). Напыление происходит в специальном реакторе при высоком вакууме и мощном электрическом поле. В результате напыления на 8–12-дюймовой пластине получается 10–30 тыс. однотипных кристаллов размером не более 1 мм. Кристалл имеет две контактные площадки размером 30–80 мк каждая.

Скрайбирование (разделение полупроводниковых пластин на отдельные кристаллы).

На оборотную сторону пластины наносится лента и надрезаются в пластине канавки, глубиной, равной ¾ толщины пластины. В этом процессе применяется дисковая пила, работающая в струе дистиллированной воды. Далее пластина вставляется в специальные пяльцы и растягивается до тех пор, пока целостность полупроводниковой пластины не нарушится и кристаллы не разделятся на отдельные элементы (кристаллы остаются на липкой пленке).

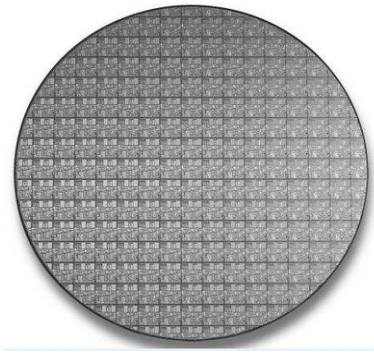


Рис. 3. Расположение светодиодных кристаллов на полупроводниковой пластине

Первичный осмотр пластины в лаборатории. После изготовления светодиодных кристаллов лаборатория проводит выборочные испытания на высокоточном метрологическом оборудовании и приклеивает на оборотную сторону пластины ее персональный штрих-код. При сканировании роботом-тестером штрих-кода в таблицу, созданную для партии исследуемых кристаллов, вносятся эталонные значения тестируемых параметров. Эти значения поступают от заказчика. Сравнивая значения, полученные в ходе тестирования с эталонными значениями, дается оценка качества светодиодного кристалла.

Тестирование. Особенностью светодиодных источников света является разброс светотехнических параметров (рис. 4). С помощью робота-тестера испытывают каждый полученный кристалл. Сначала сканер штрих-кодов, установленный на робот-тестер, анализирует штрих-код, прикрепленный к задней

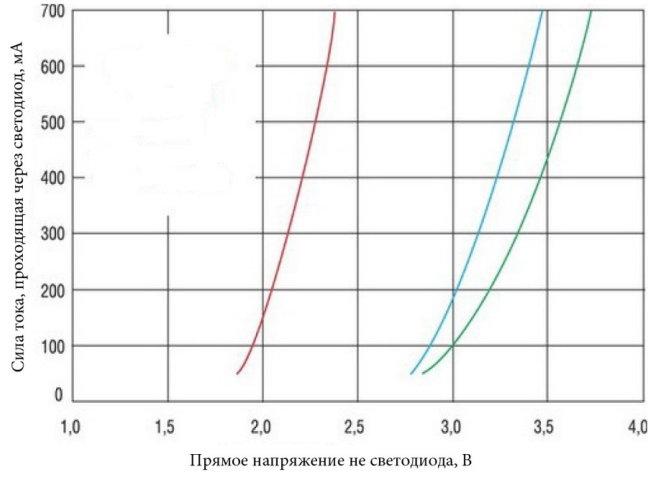


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика красного, зеленого и синего (белого) светодиодов

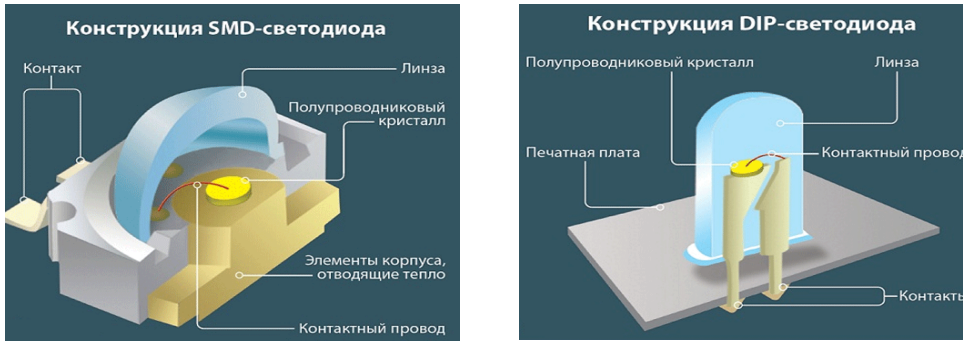
поверхности пластины и вносит эталонные значения в таблицу данной партии кристаллов. После этого робот-тестер подводит электроды к контактным площадкам и подает на них контрольный ток. При этом кристалл начинает светить-

ся, происходит измерение энергии светового потока, доминантной длины волны излучения, координат цветности, прямого падения напряжения на кристалле при заданном токе.

Затем сравниваются полученные результаты измерений с эталонными и выносится оценка качества кристалла: «годен»/«условно годен»/«не годен». В случае, если кристалл не удовлетворяет всем требованиям заказчика, но и не является бракованным, ему присваивается статус «условно годен» и он отправляется на дальнейшие этапы производства и продается по более низкой цене. В конце данного этапа в память компьютера заносятся результаты измерений кристаллов.

Сортировка. Робот-сортировщик с помощью вакуумной присоски отделяет кристаллы от липкой основы и сортирует их согласно степени годности кристалла.

Корпусирование и заливка иммерсионного компаунда или люминофора. Если кристалл годен или условно годен, то он отправляется на данный этап производства, на котором специальный робот монтирует кристалл в прозрачный корпус (рис. 5, *а*, *б*), и пространство между кристаллом и корпусом заливается иммерсионной средой для того, чтобы исключить влияние воздушной среды, находящейся между кристаллом и оптикой корпуса, на проходящий луч. Если необходимо создать белый светодиод, то синий кристалл следует покрывать люминофором. Далее заготовку отправляют в вакуумную печь для полимеризации иммерсионного компаунда. После этого процесса будет получен готовый светодиод.



а *б*

Рис. 5. Примеры корпусов светодиодов

Стенд термо-токовой тренировки. Осуществляется проверка работоспособности светодиодов при экстремальных условиях (температура порядка 50–60 °С и максимально допустимая сила тока) на протяжении 24 ч. Отметим, что данный этап в производстве светодиодов применим только к ответственным изделиям, к которым предъявляются высокие требования.

Годные и условно годные светодиоды отправляются на склад.

Описание процесса тестирования. После измерения вышеуказанных параметров полученные результаты сравниваются с эталонными, и кристаллу присва-

ивается статус «годен»/«условно годен»/«не годен». Поскольку измерение светотехнических параметров кристалла очень ответственная процедура, требующая высокой точности измерительных приборов при малой погрешности, вызванной воздействием окружающей среды, оценку качества кристалла необходимо проводить в «темной» комнате при максимальной степени очистки воздуха.

Чтобы удешевить конструкцию робота-тестера и сделать процесс тестирования быстрее и проще, было принято решение заменить методику количественного измерения светотехнических параметров (в конкретных единицах измерения) на методику качественного измерения с использованием эталонов (сравнение текущих показаний с эталонными). Суть замены одной методики на другую заключается в том, что не обязательно устанавливать на робот-тестер дорогое высокоточное метрологическое оборудование, так как не важно получить результат в каких-либо определенных единицах измерения. Единственный важный параметр — это линейность во всех диапазонах измерений. Для оценки годности светотехнических параметров кристалла достаточно сравнить энергетические потоки, излучаемые эталонным и исследуемым кристаллом и по их разности дать оценку качества исследуемого светодиодного кристалла. Более того, поскольку измерения оптических параметров эталонного и исследуемого кристалла будут проходить в равных условиях (при одинаковой загрязненности среды, одинаковой влажности и температуре окружающего воздуха), погрешность, вносимая действием окружающей среды, не повлияет на качество измерений.

Если же есть необходимость провести количественные измерения (получить результат в определенных физических единицах измерения), то можно сравнить результат, полученный в ходе тестирования роботом-тестером, с результатом, полученным в лаборатории на специальном метрологическом оборудовании (при сопоставимости спектров излучения кристаллов). При сравнении результатов, необходимо вычислить коэффициент погрешности, вносимый средой, в которой функционирует робот, и при дальнейших измерениях умножать полученные результаты на вычисленный коэффициент. Этот коэффициент будет постоянным, потому что условия, в которых робот-тестер исследует светодиодные кристаллы остаются неизменными. Данная система значительно удешевляет стоимость тестера и ускоряет процедуру тестирования.

После того как пластина со светодиодными кристаллами прошла этап скрайбирования, она поступает на рабочий стол робота-тестера. Представили последовательность отработки робота-тестера:

Создание и заполнение Word Excel таблицы. На компьютере, синхронизированном с роботом-тестером, в Word Excel создается таблица с количеством строк, равным количеству кристаллов, и количеством столбцов, равным количеству измеряемых параметров (энергии светового потока, доминантной длины волны излучения, координат цветности, прямого падения напряжения на кристалле), и столбец оценки годности кристалла. В эту таблицу вносятся все данные, полученные в результате тестирования светодиодной пластины с кристаллами. Каждая строка соответствует порядковому номеру светодиодного кристалла, и

все данные, полученные в результате испытаний *n*-ого кристалла полупроводниковой пластины заносятся в *n*-ю строку в соответствующие столбцы.

Эта таблица служит отчетом о качестве изготовленной партии кристаллов.

Определение расстояния между контактными площадками с помощью программы Cura. Камера, установленная в робот-тестер, делает снимок пластины с кристаллами и отправляет изображение на компьютер в программу Cura. Программа Cura строит модель светодиодной пластины с кристаллами и проводит процесс распознавания геометрических примитивов модели пластины и анализ цветового контраста полученного изображения. Поскольку контактные площадки имеют золотистый цвет и характерную форму (рис. 6), присущую каждому типу кристалла (на пластине все кристаллы однотипные), программа Cura может определить местоположение каждой контактной площадки и расстояние между двумя соседними контактными площадками, относящимися к одному кристаллу, к которым в дальнейшем будут подведены щупы-электроды для подачи тока на полупроводник. Таким образом, программа Cura исследует светодиодную пластину с кристаллами и возвращает в компьютер информацию о местоположении каждого кристалла на исследуемой пластине.

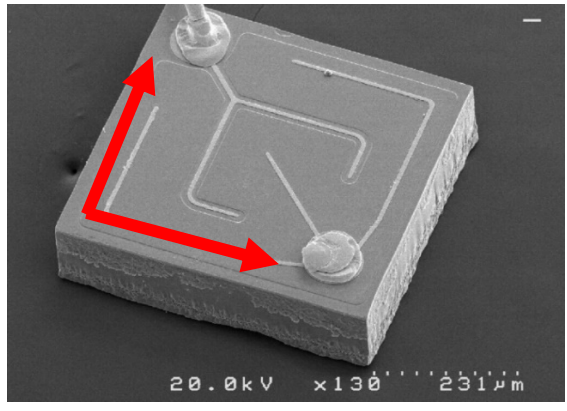


Рис. 6. Расположение контактных площадок на кристалле (ув. ×130)

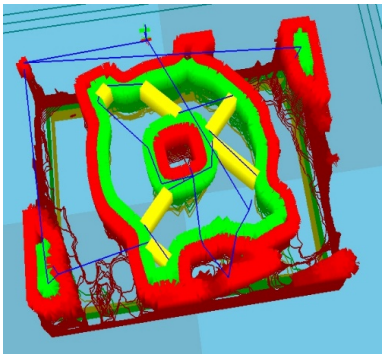


Рис. 7. 3D-модель светодиодного кристалла

Построение 3D-модели светодиодного кристалла было проведено в программе Cura (рис. 7).

Подведение щупов-электродов к контактным площадкам кристалла. На подвижной части робота-тестера установлен модуль щупов-электродов (рис. 8). Поскольку расстояние между контактными площадками может изменяться в зависимости от типов кристаллов, то целесообразно сделать этот модуль сменным и под разные типы светодиодных кристаллов установить разные типы щупов-

электродов. Сами электроды подпружинены, поэтому в случае неверного вычисления расстояния от подвижной части робота-тестера до контактных площадок кристалла разрушения исследуемого образца не произойдет.

Рис. 8. Модуль щупов-электродов, смонтированный на подвижной каретке робота-тестера

Подача тока на контактные площадки кристалла и исследование кристалла. Так как щупы-электроды подключены к прецизионному блоку питания, то через них к кристаллу подводится контрольный ток. На блоке питания отображается значение прямого падения напряжения на светодиодном кристалле, и это значение заносится в таблицу Excel. Как сказано выше, значение поступает в определенную строку, равную порядковому номеру кристалла, в соответствующий столбец, отвечающий за измеряемый параметр. После занесения значения падения напряжения в таблицу, сенсор спектрофотометра, установленный на подвижной части робота-тестера, регистрирует энергию светового потока и другие светотехнические параметры, излучаемые светящимся кристаллом (рис. 9).

Рис. 9. Подача тока на контактные площадки кристалла

После измерения светотехнических параметров программа, связывающая спектрофотометр с компьютером, отправляет данные об измерении в таблицу Excel. Когда все светотехнические и электрические параметры исследованы и занесены в таблицу, программа Excel проводит сравнение полученных результатов с эталонными и заполняет колонку годности кристалла как «годен»/«условно годен»/«не годен» согласно допустимому разбросу значений исследуемых параметров.

После этого щупы-электроды робота-тестера позиционируются относительно контактных площадок следующего кристалла, Word Excel переводит курсор на следующую строку и цикл исследования полупроводникового кристалла повторяется.

Устройство макета робота-тестера. Уникальность данного макета заключается в том, что он не создавался с нуля. Для отработки процесса позиционирования щупов-электродов относительно контактных площадок кристалла не пришлось изобретать агрегат, который мог бы перемещаться в трех координатных направлениях (*x*, *y*, *z*). Чтобы выполнить эту задачу, был взят готовый 3D-принтер дельтовидной конструкции (рис. 10), в котором каретка с нагревательным элементом и соплом для подачи пластика была заменена на самодельную каретку с модулем щупов-электродов, подключенных к прецизионному программируемому источнику тока и напряжения (см. рис. 8, рис. 11).

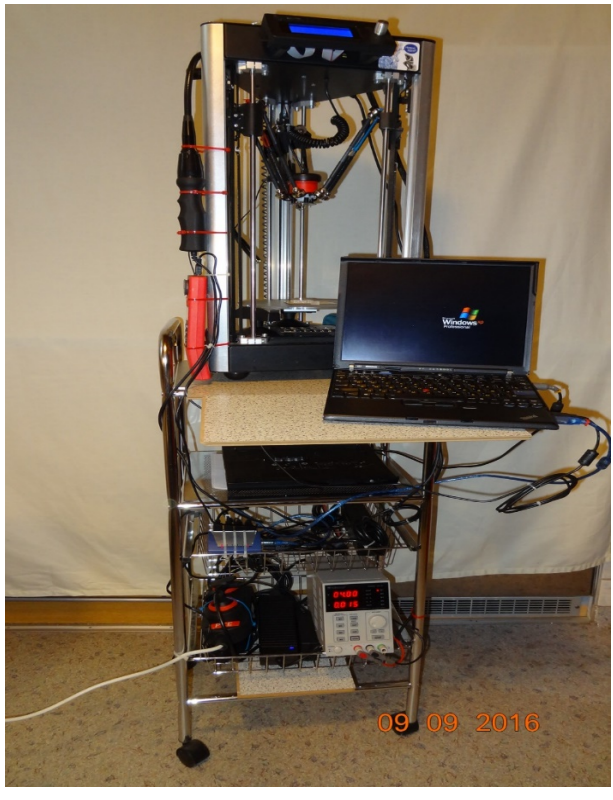


Рис. 10. Макет робота-тестера в основе которого находится 3D-принтер дельтовидной конструкции

Поскольку демонстрация реальных функциональных возможностей робота-тестера в реальном масштабе требует полноценного машинного зрения, была принята концепция увеличения масштаба исследуемой полупроводниковой пластины в 10 раз (рис. 12). Тем не менее механические возможности робота позволяют исследовать реальные светодиодные кристаллы.

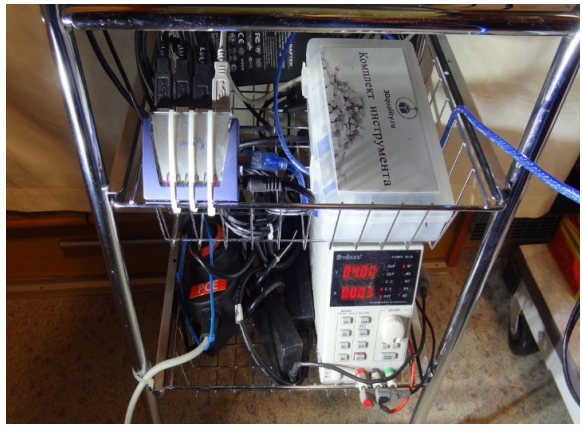


Рис. 11. Прецизионный программируемый источник тока и напряжения

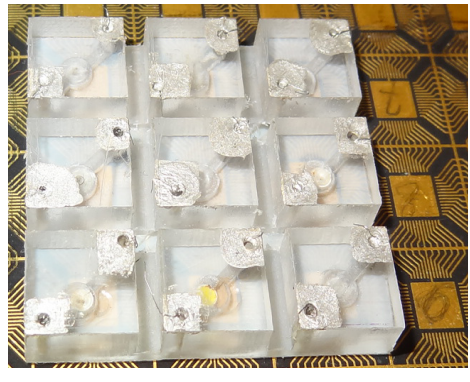


Рис. 12. Макет полупроводниковой пластины с кристаллами

Таким образом, макет робота-тестера состоит из следующих узлов: дельта-манипулятора, с установленными на него нижеперечисленными сенсорами (см. рис. 10);

- подвижной каретки, с закрепленными на ней щупами электродами и сенсором спектрофотометра (см. рис. 8).
- спектрофотометра, состоящий из двух частей: светочувствительного сенсора (установленного на подвижную каретку) и блока обработки аналого-цифрового значения энергии светового потока излучения и других светотехнических параметров (смонтирован на стойку манипулятора) (см. рис. 8, рис. 13) [2, 3];
- видеокамеры как элемента машинного зрения (рис. 14);
- прецизионного программируемого источника тока и напряжения для исследования прямого падения напряжения на *p–n* переходе кристалла при контрольном токе (см. рис. 11);

Рис. 13. Блок обработки аналого-цифрового значения энергии светового потока излучения

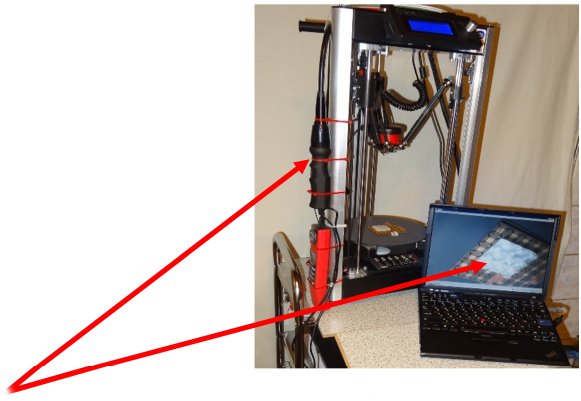


Рис. 14. Видеокамера (*1*) и изображение (*2*) рабочего стола робота-тестера, полученное с нее

- макета исследуемой пластины с кристаллами (см. рис. 12);
- ПК (см. рис. 10);
- USB HUB для подключения манипулятора и всех сенсоров к компьютеру (рис. 15);
- сканера штрих-кодов (рис. 16);
- набора эталонных светодиодов (рис. 17).

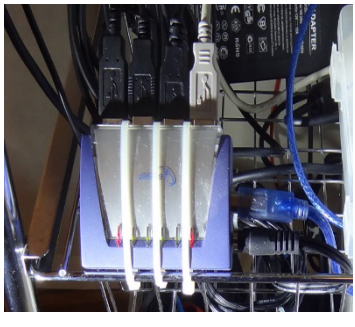


Рис. 15. USB HUB

Рис. 16. Сканер штрих-кодов

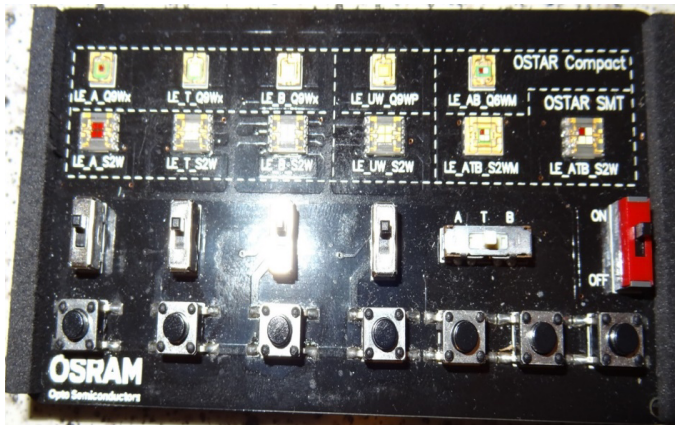


Рис. 17. Набор эталонных светодиодов

Алгоритм работы макета робота-тестера. Отметим, что в представленном макете робота-тестера не организовано обнаружение контактных площадок посредством машинного зрения, так как это очень сложная задача, поэтому позиционирование каретки робота-тестера относительно контактных площадок кристалла происходит согласно заранее изученным координатам каждого кристалла.

Последовательность действий такого макета робота-тестера при исследовании светодиодного кристалла осуществляется в следующем алгоритме:

1) подведение щупов-электродов к контактным площадкам светодиодного кристалла;

2) подведение тока к контактным площадкам кристалла и измерение светотехнических и электрических параметров излучения;

3) передача результатов исследования кристалла в компьютер и занесение в Excel посредством MacroMaker;

4) сравнение полученных результатов с эталонными и сортировка кристаллов по группам пригодности, выявление брака (Excel).

Программно-аппаратный комплекс. Перечислим программы, задействованные в работе робота-тестера:

Pronterface — управление движением каретки 3D-принтера;

Word Excel — хранение координат кристаллов на полупроводниковой пластине и оценка годности светодиодных кристаллов;

LABPS305D — обмен данными между цифровым блоком питания и компьютером;

UT382 Ver.2.00 — обмен данными между цифровым спектрофотометром и компьютером;

MacroMaker — объединяющая все программные компоненты в единую последовательную цепочку посредством их внутреннего интерфейса [4].

Последовательность отработки программно-аппаратного комплекса представлена на рис. 18.

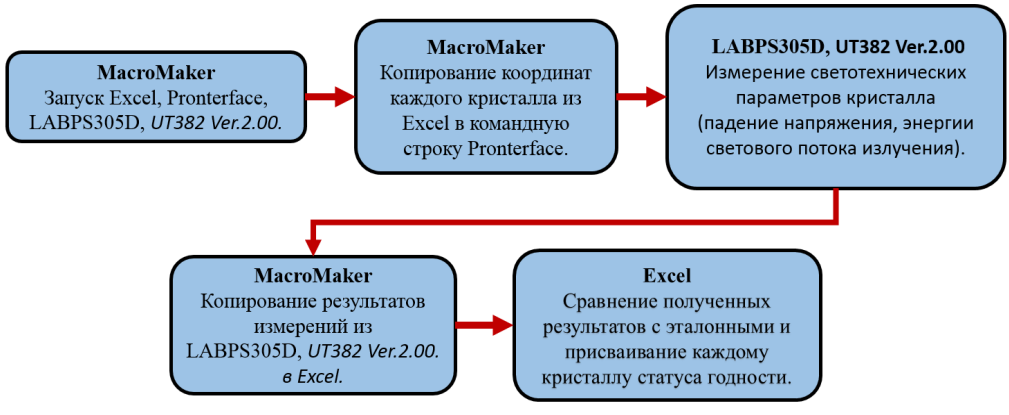


Рис. 18. Последовательность отработки программно-аппаратного комплекса

В работе робота-тестера используется множество программ. Чтобы связать их между собой и организовать определенную последовательность отработки

каждой из программ, было принято решение использовать Macro Maker — программный продукт, имитирующий движение курсора по экрану компьютера.

Инновации. В этой части статьи еще раз отметим новшества, присутствующие в представленной научно-исследовательской работе.

Тематика проекта. Поскольку светодиодные источники освещения получили свое распространение совсем недавно, то все работы, связанные с тестированием светодиода, еще не автоматизированы и проводятся вручную большим количеством высококвалифицированных специалистов. Следовательно, любая автоматизация процесса является инновацией в этой области.

Замена методики количественных измерений на методику качественных измерений с использованием эталонов в области светотехнических параметров. Суть этой инновации описана выше. Благодаря данному новшеству оценку качества кристаллов можно проводить в разы быстрее и не требовать высокой количественной точности, а следовательно, и высокой стоимости оборудования, установленного на роботе-тестере, а также измерения можно проводить не в идеальных условиях, поскольку при сравнении параметров тестируемого кристалла с параметрами эталонного кристалла погрешность среды одинакова в обоих случаях и на результат сравнения не влияет.

Использование модернизированного 3D-принтера в качестве установки для позиционирования щупов-электродов относительно контактных площадок светодиодного кристалла. Это решение значительно удешевило тестер-комплекс и сделало его более компактным.

Использование программы MacroMaker как связующее звено всех программных компонентов робота-тестера. Благодаря этому не пришлось писать программное обеспечение для всего робота-тестера с нуля. Также удалось обойтись без вмешательств в авторские права каждого программного компонента, потому что использование MacroMaker аналогично работе человека с интерфейсом каждой программы.

Тестирование с помощью сменного модуля щупов-электродов. Это самый оптимальный вариант для тестирования светоизлучающих кристаллов с разным расстоянием между контактными площадками. Создавать модуль щупов-электродов, который может изменять расстояние между щупами-электродами, нецелесообразно по причине высокой стоимости и сложности создания подобного модуля.

Недостатки предложенного макета робота-тестера. Во-первых, в макете робота-тестера проводится исследование определенной пластины с кристаллами, робот опускает щупы-электроды на заранее заданные ему координаты. Поскольку на производстве типы светодиодных пластин с кристаллами могут изменяться, необходимо создать алгоритм поиска контактных площадок кристалла посредством машинного зрения. Во-вторых, вследствие упрощенной конструкции отсутствует возможность встраивания робота-тестера в конвейерный поток. В-третьих, низкая скорость тестирования в связи с необходимостью визуальной демонстрации технологии исследования светодиодной пластины [5, 6].

Анализ полученных результатов. Полученные результаты дают уверенность в том, что используемая технологи тестирования полупроводниковых кристаллов выбрана успешно и может быть внедрена в реальное производство светодиодов. В результате использования робота-тестера в производстве полупроводниковой продукции значительно снизится себестоимость светодиодов, уменьшится риск брака, высвободится группа высококвалифицированных инженеров.

Литература

[1] Шуберт Ф.Е. *Светодиоды*. Москва, Физматлит, 2008, 500 с.
[2] Ярославский Л.И. *Введение в цифровую обработку изображения.* Москва, Советское радио, 1979, 312 с.
[3] Кравченко В.Ф., ред. *Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях.* Москва, Физматлит, 2007, 544 с.
[4] Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Князь В.А., Ходарев А.Н., Моржин А.В. *Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW и IMAQ Vision*. Москва, ДМК Пресс, 2008, 464 с.
[5] Пучков А.А., Соболев В.Ф., Петухов А.В. *Основы технологии машиностроения.* Гомель, Государственный технический университет имени П.О. Сухого, 2012, 79 с.
[6] Айзенберг Ю.Б., ред. *Справочная книга по светотехнике.* Москва, Знак, 2006, 972 с.

Дмитриев Олег Ильич — студент кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — С.С. Гаврюшин, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — С.В. Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Компьютерные системы автоматизации производства», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

MODEL OF A ROBOT-TESTER FOR EVALUATING THE QUALITY OF LED CRYSTALS

O.I. Dmitriev doleg1999@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper deals with a prototype robot designed and constructed for automated testing of electronic components, namely LEDs and LED matrices. The robot is intended to operate as a part of an automatic production line and meets all metrological requirements. The distinctive features of this design are compactness and cheapness. In this paper we describe the technology of testing LEDs in detail and present all robot components and sensors, as well as an algorithm for testing the hardware and software system. The results obtained are analyzed and the prospects for further development of this technology are presented by introducing elements of machine vision.

Keywords

Automated process, robot-tester, elements of machine vision, light-emitting diode. 3D printer

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

[1] Shubert F.E. Svetodiody [Light emitting diodes]. Moscow, Fizmatlit publ., 2008, 500 p.

[2] Yaroslavskiy L.I. Vvedenie v tsifrovuyu obrabotku izobrazheniya [Introduction to digital image processing]. Moscow, Sovetskoe radio publ., 1979, 312 p.

[3] Kravchenko V.F., ed. Tsifrovaya obrabotka signalov i izobrazheniy v radiofizicheskikh prilozheniyakh [Digital signal and image processing in radiophysical applications]. Moscow, Fizmatlit publ., 2007, 544 p.

[4] Vizil'ter Yu.V., Zheltov S.Yu., Knyaz' V.A., Khodarev A.N., Morzhin A.V. Obrabotka i analiz tsifrovykh izobrazheniy s primerami na LabVIEW IMAQ Vision [Digital image processing and analysis with LabVIEW and IMAQ Vision examples]. Moscow, DMK Press publ., 2008, 464 p.

[5] Puchkov A.A., Sobolev V.F., Petukhov A.V. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya [Fundamentals of mechanical engineering]. Gomel', Sukhoi State Technical University of Gomel publ., 2012, 79 p.

[6] Ayzenberg Yu.B., ed. Spravochnaya kniga po svetotekhnike [Handbook on lighting technology]. Moscow, Znak publ., 2006, 972 p.

Dmitriev O.I. — student, Department of Computer Systems of Manufacturing Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — S.S. Gavryushin, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department of Computer Systems of Manufacturing Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — S.V. Ivanovich, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Computer Systems of Manufacturing Automation, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.