УДК 621.383:620.1

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СВЕТОДИОДОВ К ВОЗДЕЙСТВИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Мамадалиев Махаммаджон Ахмадалиевич
ассистент Андижанский государственный технический институт

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы эксплуатационной устойчивости светодиодов и светодиодных модулей при воздействии механических и климатических факторов. Проанализировано влияние температуры, влажности, температурного циклирования, вибрации и механических нагрузок на электрические, оптические и тепловые характеристики. Систематизированы основные механизмы деградации кристалла, межсоединений, паяных соединений, люминофора и корпуса. Предложен комплексный подход к оценке надежности, включающий ускоренные испытания, тепловой анализ, контроль параметров и моделирование комбинированных воздействий.

Ключевые слова: светодиод, надежность, климатические воздействия, механические нагрузки, температура, влажность, вибрация, термоциклирование, тепловой менеджмент.

UDC 621.383:620.1

INVESTIGATION OF LED RESISTANCE TO MECHANICAL AND CLIMATIC LOADS

Mamadaliyev Makhammadjon Akhmadalievich
assistant Andijan state technical institute

Abstract. The paper considers the operational reliability of light-emitting diodes and LED modules under mechanical and climatic stresses. The influence of temperature, humidity, thermal cycling, vibration and mechanical loads on electrical, optical and thermal characteristics is analyzed. The main degradation mechanisms of the LED chip, interconnections, solder joints, phosphor and package are systematized. A comprehensive reliability assessment approach combining accelerated testing, thermal analysis, parameter monitoring and modeling of combined stresses is proposed.

Keywords: LED, reliability, climatic effects, mechanical loads, temperature, humidity, vibration, thermal cycling, thermal management.

Введение

Светодиодные источники света широко применяются в промышленном, транспортном, бытовом и уличном освещении благодаря высокой световой эффективности, длительному сроку службы, малым габаритам и возможности цифрового управления. Однако достижение заявленных характеристик определяется не только параметрами полупроводникового кристалла, но и надежностью всего светодиодного устройства.

В реальных условиях светодиоды подвергаются одновременному воздействию температуры, влажности, вибрации, ударов, загрязнения и электрических перегрузок. Деградация может происходить на уровне кристалла, контактов, межсоединений, паяных соединений, люминофора, оптических элементов и корпуса.

Актуальность исследования связана с расширением области применения LED-систем в условиях, где температура, влажность и механические воздействия изменяются в широких пределах. Поэтому оценка устойчивости должна учитывать совокупность воздействий и их взаимное влияние.

Материалы и методы исследования

Для анализа устойчивости светодиодов внешние воздействия разделены на климатические и механические. К климатическим относятся повышенная и пониженная температура, влажность, температурные циклы и конденсация. К механическим относятся вибрация, ударные нагрузки, циклические деформации и напряжения, возникающие вследствие различия коэффициентов теплового расширения материалов.

Температурное воздействие является одним из наиболее существенных факторов надежности. При повышении температуры ускоряются физические и химические процессы старения материалов и изменяются электрические параметры p-n-перехода. Недостаточный отвод тепла повышает температуру перехода и ускоряет деградацию.

Для оценки температурной устойчивости применяются длительные испытания при заданной температуре, температурное циклирование и ускоренные испытания. При циклировании образцы последовательно выдерживаются при высоких и низких температурах с контролируемыми скоростями нагрева и охлаждения.

Влажность может изменять свойства материалов, ускорять коррозионные процессы и ухудшать состояние металлических контактов. При температурных градиентах возможно образование конденсата, что повышает вероятность электрических утечек и коррозии.

Механическая устойчивость исследуется с помощью вибрационных и ударных испытаний. Вибрация вызывает повторяющиеся механические напряжения в паяных соединениях и местах крепления компонентов, а длительное воздействие может приводить к усталостным повреждениям.

Для количественной оценки деградации используются прямое напряжение, рабочий ток, световой поток, цветовые координаты, температура корпуса и температура p-n-перехода. Критерием отказа может быть заданное снижение светового потока либо выход электрических параметров за установленные пределы.

Результаты исследования

Анализ механизмов отказа показывает, что устойчивость LED определяется взаимодействием нескольких конструктивных и эксплуатационных факторов. При повышенной температуре необходимо контролировать тепловое сопротивление между p-n-переходом и окружающей средой.

Конструкция корпуса и теплового интерфейса имеет большое значение. Металлическая подложка, теплопроводящий материал, радиатор и способ монтажа должны обеспечивать эффективный отвод тепла. Воздушные зазоры и ухудшение теплового контакта увеличивают температуру устройства и сокращают ресурс.

Температурное циклирование опасно для многослойных LED-конструкций. Различие коэффициентов теплового расширения кристалла, металлов, припоя, подложки и корпуса приводит к механическим напряжениям. При многократном повторении циклов они способны инициировать усталостные повреждения.

Воздействие влажности усиливает деградацию при наличии загрязнений и электрического потенциала между проводящими участками. Для повышения устойчивости применяются герметизация, защитные покрытия, влагостойкие материалы и конструктивные решения, препятствующие проникновению влаги.

Механические воздействия особенно важны для светодиодных систем на транспортных объектах, промышленных установках и конструкциях, подверженных вибрации. Механические и термические факторы следует рассматривать совместно: температура изменяет свойства материалов, а вибрация и деформация могут ухудшать тепловой контакт.

Наиболее информативным является комплексный подход, при котором после каждого этапа климатических или механических испытаний измеряются электрические, световые и тепловые характеристики. Это позволяет определить скорость деградации и наиболее критичный фактор.

Обсуждение

Надежность LED-систем определяется не только характеристиками полупроводникового материала. Существенную роль играют технология сборки, качество паяных соединений, конструкция корпуса, оптические материалы и система теплового управления.

Для практической оценки целесообразно применять последовательность испытаний: предварительное измерение параметров, воздействие заданного фактора, промежуточный контроль, повторное воздействие и итоговая оценка. Такой подход позволяет определить постепенное ухудшение характеристик.

Перспективным направлением является математическое моделирование. Тепловые и механические модели позволяют определить распределение температуры и напряжений в корпусе LED, подложке и паяных соединениях. Совместное применение расчетов и эксперимента позволяет оптимизировать конструкцию.

Для промышленных и наружных LED-систем целесообразен цифровой мониторинг температуры и электрических параметров. Эти данные могут использоваться для выявления деградации и прогнозирования остаточного ресурса.

Заключение

Устойчивость светодиодов к механическим и климатическим нагрузкам является комплексной характеристикой, зависящей от конструкции, материалов, технологии сборки и условий эксплуатации. Наиболее значимыми факторами являются температура, температурное циклирование, влажность, вибрация и ударные воздействия.

Для повышения надежности необходимо совершенствовать систему теплового отвода, обеспечивать защиту от влаги, повышать механическую прочность соединений и применять материалы с согласованными коэффициентами теплового расширения.

Практическая эффективность комплексного подхода заключается в возможности выявления наиболее уязвимых элементов LED-конструкции до начала массовой эксплуатации. В дальнейшем целесообразно разработать экспериментальную методику ускоренного испытания LED-модулей с одновременным воздействием температуры, влажности и вибрации.

Использованные источники

1. Chang M.-H., Das D., Varde P.V., Pecht M. Light emitting diodes reliability review // Microelectronics Reliability. 2012. Vol. 52, No. 5. P. 762–782. DOI: 10.1016/j.microrel.2011.07.063.

2. Singh P., Tan C.M. A review on the humidity reliability of high power white light LEDs // Microelectronics Reliability. 2016. Vol. 61. P. 129–139. DOI: 10.1016/j.microrel.2015.12.002.

3. Yang S.-C. et al. Failure and degradation mechanisms of high-power white light emitting diodes // Microelectronics Reliability. 2010. Vol. 50, No. 7. P. 959–964. DOI: 10.1016/j.microrel.2010.03.007.

4. Nogueira E., Vázquez M., Núñez B. Evaluation of AlGaInP LEDs reliability based on accelerated tests // Microelectronics Reliability. 2009. DOI: 10.1016/j.microrel.2009.06.031.

5. van Driel W.D. et al. Reliability of LED-based systems // Microelectronics Reliability. 2022. Vol. 129. Article 114477. DOI: 10.1016/j.microrel.2022.114477.