

Отказы светодиодов и методы их анализа

Холгер Просс (Holger Pross)
RoodMicrotec GmbH

Светодиоды открывают дорогу новым приложениям и различным рынкам с широким рядом требований. Помимо прочих выгодных характеристик, светодиоды обеспечивают высокую надежность и большой срок службы — свыше 50 тыс. ч, однако производственный брак и плохие условия эксплуатации могут заметно снизить надежность этих изделий. Для того чтобы избежать отказа или быстро найти решение возникших проблем, требуется хорошо разбираться в механизмах сбоя и использовать подходящие методы анализа.

НАЗНАЧЕНИЕ СВЕТОДИОДОВ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Кристалл светодиода представляет собой полупроводник, в котором свет генерируется в области р-п-перехода при электронно-дырочной рекомбинации. Активная зона является сложной структурой, состоящей из эпитаксиальных слоев. Для генерации различного цвета используются разные комбинации материалов: для получения красного цвета — InAlGaP; голубого — InGaN; инфракрасного излучения — GaAlAs; ультрафиолета — AlGaN. Материал и свойства эпитаксиальных слоев, по сути, определяют эффективность генерируемого света. Основные компоненты светодиода на плате представлены на рисунке 1.

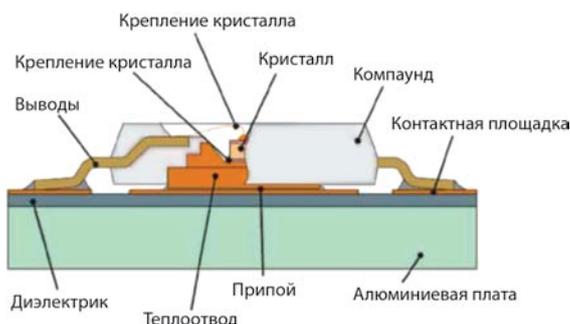


Рис. 1. Основные компоненты светодиодного модуля на плате

К основным параметрам светодиода относятся ток и температура T_j внутри активного слоя. Оба этих параметра определяют потребление энергии и цвет излучения, а также срок службы изделия.

На рынке предлагаются светодиоды, изготовленные по разным технологиям. Необходимое условие работы светодиода — устойчивое прохождение тока через паяное и клеевое соединения, достаточное охлаждение кристалла с помощью хорошего теплового контакта с окружающей средой или теплоотвода, а также хорошее извлечение света из кристалла с помощью оптических элементов и отражателей.

Как правило, светодиоды заключаются в оболочку из прозрачного материала (силиконовая или эпоксидная смолы). Для реализации белого свечения наносится такой вид люминофора, который преобразует голубое излучение светодиодов в излучение с широким спектром, который близок к спектру белого света.

РЕЖИМЫ ОТКАЗА СВЕТОДИОДОВ

Дефекты светодиодов условно относятся к следующим категориям: кристалл как центральный элемент, а также внутренняя и внешняя структуры. Мы рассмотрим ряд механизмов отказа светодиодов, которые соответствуют разным технологиям сборки, типам конструкций, а также приложениям.

Тип отказа: кристалл

В условиях нормальной работы оптические характеристики светодиодов, как правило, ухудшаются со временем, т.е. у светодиодов ограничен срок службы. Ухудшение характеристик вызвано появлением дефектов в эпитаксиальных слоях или на их границах, что приводит к увеличению доли безызлучательной рекомбинации и снижению оптической эффективности. Как правило, 30–50% ухудшения оптических характеристик определяется как дефект, а ожидаемый эксплуатационный ресурс составляет 20–100 тыс. ч.

Старение светодиодов, вызванное ростом дефектов, в значительной мере зависит от температуры перехода T_j и тока. Следовательно, необходимо контролировать эти параметры, чтобы светодиод прослужил ожидаемое время. Ускоренное старение, т.е. уменьшение светоотдачи в течение определенного периода времени ниже ожидаемого, вызвано такими негативными факторами как низкое качество эпитаксиальных слоев, а также более высокая температура перехода из-за недостаточно хорошего рассеяния тепла. Более того, проникновение влаги или других загрязняющих веществ, разрушения, вызываемые электростатическим зарядом, а также нестабильным источником питания, ускоряют деградацию эпитаксиальных слоев.

Тип отказа: внутренняя конструкция светодиода

Затрудненное прохождение тока из-за роста электрического сопротивления часто становятся причинами, приводящими к уменьшению светового потока, временной нестабильности или даже к полному отказу. Наблюдается также расслоение перехода между кристаллом и проволочным соединением. Поскольку площадь поверхности раздела между кристаллом и подложкой довольно-таки существенно влияет на рассеяние тепла, раз-

рушение промежуточного слоя приводит к увеличению теплового сопротивления и температуры кристалла, что также ускоряет старение светодиода.

Технология производства светодиодов является источником многих отказов. Процесс пайки в этом отношении особенно важен, т.к. тепловая перегрузка может привести к появлению трещин, отсоединению или отслоению материалов вдоль границ поверхностей из-за различия в коэффициентах расширения. Основой создания кристаллов с продолжительным сроком службы являются проверка соответствия изделия техническим условиям и контроль качества на производстве, а также хороший контроль процесса пайки во время монтажа компонентов.

Такие прозрачные герметизирующие материалы как силиконовая или эпоксидная смолы не являются герметичной изоляцией и, следовательно, не защищают от водяных паров или других разрушающих веществ. Более того, механическое напряжение, например, при изгибе выводов светодиода или термическое напряжение во время пайки может привести к образованию трещин или отделению компаунда, а также к проникновению загрязняющих веществ в кристалл или металлический контакт. При неблагоприятных условиях это приводит к изменению структуры эпитаксиальных слоев или к разрушению поверхностей их раздела (см. рис. 2).

Другими типовыми механизмами, снижающими срок службы светодиодов, являются старение герметизирующих материалов под воздействием ультрафиолетового излучения или деградация люминофора белых светодиодов, что также сказывается на изменении цвета белых светодиодов (пожелтение). Этот эффект имеет большее воздействие, чем регулярное старение кристалла.

Тип отказа: монтаж светодиодов на плату

При интеграции светодиодов на печатную плату следует учитывать такие источники отказа как сбой в работе электрических соединений, вызванный плохими паяными контактами. На деградации источников света, особенно

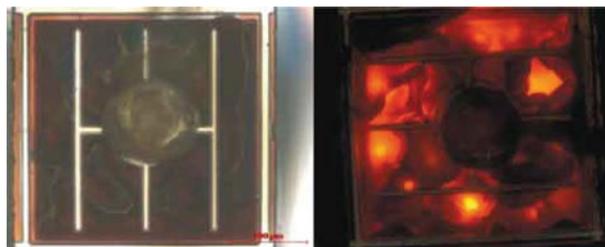


Рис. 2. Коррозия поверхности под микроскопом в отраженном (слева) и в проходящем (справа) свете. Внезапный отказ может быть вызван электростатическим разрядом или электрическим перенапряжением, которые заметно разрушают эпитаксиальный слой

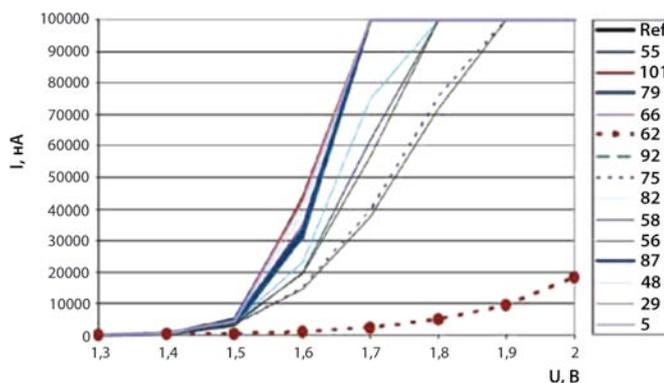


Рис. 3. Типовые вольт-амперные характеристики (ВАХ) различных типов светодиодов

мощных светодиодов, сказываются тепловой контакт и рассеяние тепла. Монтаж должен обеспечить устойчивый тепловой контакт в течение всего срока службы.

Поскольку содержащаяся в светодиодах влага может привести, особенно в процессе пайки, к возникновению т.н. «эффекта поп-корна», следует принять меры по обеспечению влагонепроницаемости. В некоторых приложениях светодиоды снаружи покрывают защитным лаком или герметиком. Механическое или термическое напряжение, воздействующее на внутреннюю структуру светодиода, а также взаимодействие этой структуры с дегазованными материалами могут вызвать ее разрушение.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Светодиоды характеризуются большим количеством разнотипных отказов, которые устраняются с помощью разных аналитических методов. Цель анализа отказов — связать известную модель сбоя с возможной причиной его возникновения, а затем найти способ устранения.

Методы поиска ошибок

– Вопросы: в каких условиях эксплуатировался светодиодный

модуль? Как долго? В каком режиме управления?

– Измерения: вольт-амперная характеристика (см. рис. 3); интенсивность света; длина волны/цвет; характеристики излучения.

– Неразрушающий анализ: рентгеновская микроскопия (см. рис. 4); оптическая микроскопия и акустическая микроскопия.

– Разрушающие методы: послойный анализ; вскрытие корпуса.

– Физический анализ: FIB/REM, OBIRCH, эмиссионная микроскопия, EBIC, катодолюминесценция.

Для того чтобы ограничить объемы исследований, необходимо создать эффективную методологию анализа, опирающуюся на

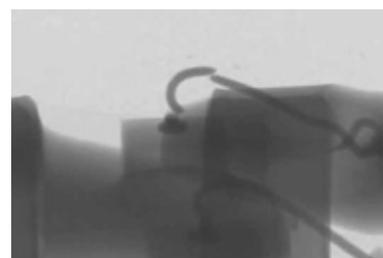


Рис. 4. Рентгеновская микроскопия разорванного проволочного соединения

полученную информацию о причинах отказа.

Визуальный контроль с помощью светолучевой микроскопии

Визуальная инспекция дает сведения о внешней конструкции, внешней целостности светодиодного модуля и доступных частях внутренней конструкции.

Измерение оптоэлектрических параметров

Важными оптоэлектрическими параметрами являются оптическая мощность, спектр и вольт-амперная характеристика.

Характеристики излучения в дальнем и ближнем поле обнаруживают неоднородность светоизлучающей зоны. Измерение теплового сопротивления свидетельствуют о проблемах с тепловой развязкой. Повышенное напряжение в прямом направлении указывает на нарушение в прохождении тока. Увеличение тока утечки при обратном смещении говорит о серьезных нарушениях в эпитаксиальных слоях. Сравнение ВАХ отказавших светодиодов (см. рис. 5) и тех, что продолжают работать, позволяет выявить причины сбоя.

Высокоточные методы оптической микроскопии позволяют обнаружить нарушения структур на поверхностях раздела между слоями. В ходе рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа определяются эффекты разрушения слоев, и дается оценка возможных причин коррозии.

Другие неразрушающие методы

В силу того, что светодиоды, как правило, устанавливаются в пластиковые корпуса, отделение соединительного провода от кристалла светодиода можно определить с помощью рентгеновского микроскопа (см. рис. 6). Чтобы

обнаружить расслоение поверхностной границы, используется также акустическая микроскопия.

Разрушающие физические методы

Для установления причин отказа в светодиоде требуется прямой доступ к внутренним элементам — кристаллу (см. рис. 7) или к границе раздела между выводом и контактной площадкой (см. рис. 8). Кроме того, с этой целью применяется послойный анализ или удаление герметизирующих материалов с помощью химических растворителей.

Анализ причин отказа на уровне кристалла

Для установления причин отказа на уровне кристалла существуют методы обнаружения на нем дефектных зон — темных пятен или линий. Такие методы основаны на локальной стимуляции эмиссии света (катодолюминесценции) или возникновении тока под воздействием направленного на кристалл внешнего электронного пучка (EBIC — Electron Beam-Induced Current) либо лазерного пучка (OBIC — Optical Beam-Induced Current).

Такие специальные методы как TEM (Transmission Electron Microscopy — просвечивающая электронная микроскопия) и подготовка образца с помощью FIB (Focused Ion Beam — сфокусированный ионный пучок) требуются для более глубокого анализа причин отказов в эпитаксиальных слоях. Для оценки полученных результатов необходима возможность сравнения с уже известными моделями ошибок и образцовые модели, поскольку дефектные структуры внутри полупроводника в большой степени зависят от приме-

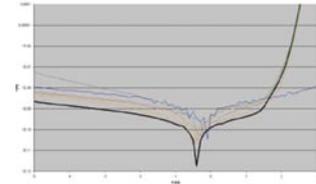


Рис. 5. Обобщенная вольт-амперная характеристика неисправных светодиодов

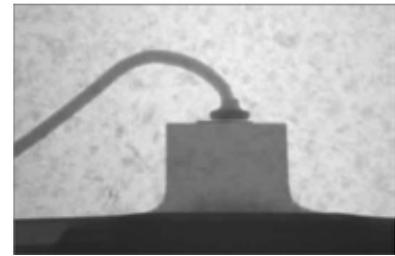


Рис. 6. Отделение соединительного провода от кристалла. Изображение получено методом рентгеновской микроскопии

няемой технологии. Предлагаемые методы очень дорогостоящи и используются только в особых случаях.

Выводы

Светодиоды обеспечивают высокую надежность, но она зависит от технологии их изготовления и требований приложения. В статье изложены типичные механизмы отказа, методы анализа, а также способы предотвращения возможных отказов. Хорошее понимание типичных условий возникновения отказа позволяет создать высоконадежные светодиодные изделия.

Разработчики должны не только обладать системным подходом, помогающим избежать этих отказов, но и уметь применять соответствующие методы анализа, интерпретировать модели ошибок и, что очень важно, принимать меры для предотвращения подобных проблем.



Рис. 7. На микросрезе видно отделение кристалла от подложки (справа в увеличенном виде)



Рис. 8. Разрушение контактной площадки и крепления кристалла