

# Zusammenfassung

An moderne Light Emitting Diode (LED) Module sind höchste Anforderungen in puncto Zuverlässigkeit gestellt. Um dies zu erfüllen und zusätzlich eine fortlaufende Reduktion der Produktionskosten zu ermöglichen, sind immer wieder Verbesserungen an den verwendeten Aufbautechniken und Materialien notwendig. Diese müssen höchste Ausfallsicherheit bieten. Aufgrund dessen müssen LED-Module auf die Zuverlässigkeit untersucht und die Produktionsqualität gesichert werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Transiente Thermische Analyse (TTA) hierbei eine sehr leistungsstarke zerstörungsfreie Inspektionsmethode für die Untersuchung der strukturellen Integrität von LED-Modulen ist. Lotrisse und Delaminationen im Chip, sowie schlecht benetzte Lotpads, können zuverlässig detektiert werden.

Hierzu wurde eine neue, zeitsparende Auswertemethode der TTA erarbeitet und für die Zuverlässigkeitsuntersuchung von High Power LED-Modulen angewendet. In mehreren Studien mit unterschiedlichen Lotlegierungen konnte gezeigt werden, dass mit der TTA die Zuverlässigkeit von Flip Chip LEDs auf Al-IMS Platinen bewertet werden kann. Hierbei wurden die LEDs auf die Metallkernplatinen aufgelötet und per thermischem Schock ( $-40^{\circ}\text{C}/125^{\circ}\text{C}$ ) gealtert. Anhand des transienten Signals konnten etwaige Risse in der Lötverbindung oder Delaminationen im Chip detektiert werden. Im Anfangsstadium dieser Fehler ist, mit genügend Messpunkten, eine klare Trennung der Fehlermoden möglich. Allerdings überlagern sich die Fehler mit zunehmender Alterung der Probe. Das getestete Flip Chip LED-Modul besitzt zwei Lötkontakte mit den Abmessungen von je  $910\text{ mm} \times 360\text{ mm}$ . Hierbei konnte als Auflösung dieser Analysemethode und diesem Messgerät eine Lotrisslänge von  $62\text{ }\mu\text{m}$  ausgemacht werden. Auch bei gesinterten LEDs konnte die Leistungsfähigkeit der TTA in puncto Empfindlichkeit und Effizienz speziell zur Qualitätskontrolle und Prozessentwicklung gezeigt werden.

Um detaillierte Informationen über das thermische Verhalten der LED bei etwaigen strukturellen Fehlern zu gewinnen, und für die Validierung der Inspektionsmethode, wurden zusätzlich FEM-Simulationen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde ein FE-Modell erstellt, das transiente thermische Signal der Simulation auf das Messsignal einer fehlerfreien realen LED per Optimierungssoftware kalibriert und anschließend validiert. In das Modell wurden nun Fehlermoden (Lotrisse oder Delamination) eingebaut und anschließend die thermischen Signale analysiert. Am Zeitpunkt der Kurvenseparation der Ableitungen der thermischen Impedanz können die Fehlermoden unterschieden werden.

Weiterführend wurde ein Workflow erstellt, der per Optimierungssoftware das kalibrierte Simulationsmodell automatisch auf reale fehlerhafte Proben anpasst. Diese Kopplung zwischen Messdaten fehlerhafter Proben und FEM-Simulation ermöglicht eine automatisierte Fehlermodenanalyse. Die Resultate konnten sehr gut mit den Risslängen von beispielhaften, realen Proben korreliert werden.

Abschließend wurde ein neuer beschleunigter, kombinierter Stresstest mit der In-Situ TTA entwickelt, um noch mehr und schneller Zuverlässigkeitsdaten von LED-Modulen zu erhalten. Mit der TTA bei verschiedenen Temperaturen konnten neben der fortlaufenden Degradation der Lötverbindung auch, als ein Effekt im Halbleiter, ein Drift der Vorwärtsspannung speziell bei tiefen Temperaturen festgestellt.

# Abstract

Modern light-emitting diode (LED) modules must fulfill the highest demands in terms of reliability. In order to achieve this and to enable a continuous reduction of production costs, improvements of the assembly technologies and the used materials are necessary at all time. All the components and techniques must offer a maximum fail-safe operation. This means that LED modules must continually be tested for their reliability, to ensure highest production quality.

The results of this thesis prove that Transient Thermal Analysis (TTA) is a very powerful, non-destructive method for inspecting the structural integrity of LED modules. Solder cracks and delamination in the chip as well as poorly wetted solder pads can be detected reliably.

Through this thesis, a new, time-saving TTA evaluation method was developed and used for the reliability analysis of high power LED modules. Several studies with different solder alloys have shown that the TTA can be used to evaluate the reliability of flip chip LEDs on Al-IMS boards. The LEDs were soldered onto the metal core boards and aged by thermal shock (-40°C/125°C).

The transient signal was used to detect any cracks in the solder joint or delamination in the chip. In the initial stage of the failures, with enough measuring points, a clear separation of the failure modes is possible. However, the failures overlap as the sample ages. The tested flip chip LED module has two solder contacts, each measuring 910 mm x 360 mm. A solder crack length of 62 µm could be determined as the resolution of this analysis method and this measuring device. Even with sintered LEDs, the performance of the TTA could be demonstrated in terms of sensitivity and efficiency, especially for quality control and process development.

In order to obtain detailed information about the thermal behavior of the LED in cases of structural defects and to validate the inspection method, additional FEM simulations were performed.

For this purpose, a FE model was created and calibrated to the transient thermal signal of the measurement signal of a faultless real LED using an optimization software and afterwards validated. Failure modes were then introduced into the calibrated model, such as a solder crack or a delamination in the chip, after which the resulting thermal signals were analyzed. At the time of the curve separation of the thermal impedance derivatives, the failure modes can be distinguished.

In addition, a workflow was created, that automatically adapts the calibrated simulation model to real defective samples using optimization software. This coupling between measurement data of defective samples and FEM simulation enables an automated failure mode analysis. For this purpose, lengths of solder cracks were varied in the simulation. The results correlate with crack lengths of exemplary, real specimens.

Finally, a new accelerated combined stress test with the In-Situ TTA was developed to obtain even more data on the reliability of LED modules, at a faster rate. With the TTA at different temperatures, in addition to the continuous degradation of the solder joint, a drift of the forward voltage was detected as an effect in the semiconductor, especially at low temperatures, thus a "burn-in" effect was demonstrated in this LED application.