

Introduction

L'évolution technologique des composants optoélectroniques émetteurs de type diodes électroluminescentes (LED), plus particulièrement pour des applications liées à l'éclairage, impose le challenge d'associer l'augmentation de la puissance optique à un volume millimétrique et à une fiabilité de plus en plus élevée, tout en réduisant les coûts de fabrication. Les standards de l'éclairage public imposent aujourd'hui une durée de vie supérieure à 50 000 h.

Cependant, les différentes phases de l'élaboration de ces composants doivent répondre à plusieurs critères : minimisation de la concentration de défauts dans les matériaux de la puce, maîtrise de la qualité des interfaces entre les différentes couches épitaxiées et de la qualité de surface, pour une émission optimale de la lumière. Les procédés d'assemblage doivent donc être réalisés à partir de matériaux performants en termes de dissipation thermique, et autoriser la conception d'un dispositif capable à la fois d'augmenter significativement l'extraction de lumière et de protéger la puce émettrice contre les agressions extérieures (température, vibrations, pollution chimique, etc.).

De manière générale, le mode de défaillance majeur caractérisant une LED réside dans la dégradation graduelle de la puissance optique après vieillissement. La mise en évidence du mécanisme de défaillance, à l'origine de cette dégradation, requiert la mise en œuvre de moyens d'analyses physiques pouvant s'avérer relativement longs et coûteux. Une démarche complémentaire consiste à estimer le comportement sous la forme d'un modèle électro-optique équivalent en régime statique. Les paramètres de ce modèle sont alors dépendants de la technologie, et leur évolution traduit une dérive comportementale électrique et/ou optique.

La complexité d'un composant optoélectronique de type LED, relative aux multiples procédés de fabrication de la puce utilisés et/ou aux différentes phases d'assemblage,

rend encore plus difficile la mise en évidence de l'élément responsable de la dérive de puissance optique.

Les standards de qualification actuellement exigés ne peuvent pas être assurés par les techniques habituelles de sélection des produits finis, ni démontrés par les essais accélérés visant à évaluer la durée de vie moyenne (MTTF). En effet, même en acceptant seulement deux défaillances sur un essai classique de 1 000 h avec un facteur d'accélération de 300 à 400, plusieurs centaines voire plusieurs milliers de composants sont nécessaires à la composition d'échantillons de test. Dans l'éclairage public, les standards de qualification de type JEITA ou MIL imposent d'ailleurs un minimum de composants s'élevant de 30 à 100, selon le type de vieillissement appliqué. Concernant la défaillance proprement dite, il existe des méthodes d'analyses non destructives nécessitant peu ou pas de préparation des échantillons : la thermographie infrarouge (pour une cartographie de dissipation thermique d'un composant), l'imagerie thermique par réflectométrie laser d'un composant, la caractéristique courant-tension du composant émissif, l'analyse spectrale de la lumière émise à travers la lentille optique, ou encore l'analyse de la puissance optique de sortie.

Les techniques d'analyses électro-optiques, regroupant les caractéristiques courant-tension $I(V)$, spectrales $L(E)$ et de puissance optique $P(J)$ sont couramment utilisées dans l'industrie. Cependant, la richesse des informations contenues dans ces caractéristiques est souvent peu exploitée, rarement maîtrisée. En général, le problème essentiel réside dans une interprétation des résultats obtenus, qui font souvent appel aux mécanismes de défaillance ou à la connaissance précise de la technologie et de l'architecture du composant et de son assemblage. Ainsi, les systèmes de mesure sont utilisés de manière systématique, au sein d'une vérification de fonctionnement de type « Go/No Go ».

Ce travail s'attache à considérer le composant optoélectronique comme une entité associée à une double définition :

- une définition physique, basée sur une modélisation à partir d'équations complexes régissant sa fonctionnalité liée à la technologie ;
- une définition orientée « système », plus souple d'utilisation, basée sur des modèles simplifiés avec un jeu de paramètres beaucoup plus restreints, prenant en compte l'interaction entre le composant et son environnement.

Notre étude, privilégiant la deuxième définition, s'appuie sur une méthodologie d'analyse de défaillance capable d'extraire le (ou les) mécanisme(s) de défaillance responsable(s) de la dégradation du composant. Cette méthodologie s'appuie sur une demande croissante des fabricants de LED assemblées, et permet de répondre à des besoins en termes de caractérisation et d'aide à la prévision de la fiabilité, en donnant des indicateurs de défaillance permettant de révéler les phénomènes physiques de la

dégradation induite par les contraintes environnementales. Ces besoins nécessitent une méthodologie rapide, fiable, utilisant un nombre limité d'échantillons et d'informations sur le composant étudié. Ces informations sont des paramètres fournis par les documentations techniques des fabricants ou un ensemble de grandeurs aisément mesurables. L'objectif de cette méthodologie est donc triple :

- identifier toutes les informations relatives aux matériaux constituant le composant et son assemblage *via* l'ensemble des informations données par le constructeur et des analyses physicochimiques, qui peuvent parfois nécessiter une préparation d'échantillon ; cette phase rendra possible la modélisation du composant des points de vue électro-optique et thermique, afin d'en extraire des paramètres physiques qui permettront de répondre au deuxième objectif de cette méthodologie ;
- prélocaliser les zones dégradées en utilisant des caractérisations électro-optiques et thermiques permettant d'extraire des signatures de défaillances électriques, optiques et thermiques ; ces signatures servent d'indicateurs pour localiser les parties défaillantes de la puce ou de son assemblage ;
- confirmer ces zones de dégradation à partir d'analyses physicochimiques appropriées aux matériaux à caractériser et à l'échelle des informations à extraire.

Cette étude s'attache donc à démontrer que la méthodologie mise en place dans le cadre de ces travaux de recherche est transposable à la fois aux différentes phases de conception d'un composant et à différents types de composants assemblés.

Ce livre s'articule autour de quatre chapitres.

– Le premier chapitre introduit ces travaux de recherche par un état de l'art du marché des LED et des différentes technologies à base de GaN. On poursuivra en situant le contexte économique et les technologies étudiées dans ce livre. L'ensemble de ces éléments permettra de justifier notre étude par rapport aux acteurs nationaux et internationaux du domaine.

– Le chapitre 2 rappelle les principes physiques mis en jeu dans la technologie GaN en reliant les phénomènes de transport et de transitions électroniques aux paramètres fonctionnels du composant. Ces derniers permettent la mise en place de modèles physiques équivalents du composant à partir d'analyses réalisées sur le système complet et en tenant compte des résultats issus de la littérature. Un rappel du principe de chaque analyse physicochimique est également présenté. On accentuera notre présentation sur le type de matériaux analysables mais également sur la résolution de ces analyses. Une classification des analyses physicochimiques sera donc proposée, à l'issue du chapitre, afin de renforcer le lien important entre une zone supposée dégradée et les moyens d'analyse appropriés.

– La mise en place de la méthodologie sur des LED GaN de faible puissance (< 30 mW) constituera l'objet principal du chapitre 3. Ce chapitre montrera l'adaptation de la méthodologie à la construction de la fiabilité dite « opérationnelle ».

– Le quatrième et dernier chapitre présente une étude, menée en collaboration avec un assembleur national, en vue de l'évaluation du mécanisme de défaillance impliqué dans le jaunissement de la lumière blanche de LED de puissance utilisées dans l'éclairage public. L'objectif de ce chapitre est de démontrer que la méthodologie peut également s'intégrer dès la conception d'un composant (fiabilité dite « construite »). Cette thématique entre en accord avec la méthodologie de construction de la fiabilité définie par l'équipe de recherche EDMINA (Evaluation des dispositifs micro- et nano-assemblés), au sein de laquelle ces travaux de recherche ont été réalisés.