

Bestimmung der Halbleiterparameter einer kommerziellen LED während der Alterung durch Kapazitätsmessung

Benjamin Weigt*, Prof. Kai Homeyer*, Prof. Roland Lachmayer**

*Fachgebiet: Industrieelektronik, Digital- und Lichttechnik, Hochschule Hannover Fakultät 1

**Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Leibniz Universität Hannover

<mailto:benjamin.weigt@stud.hs-hannover.de>

Die Halbleiterparameter spielen für das Alterungsverhalten einer LED eine entscheidende Rolle, da sie die optischen Größen der LED beeinflussen. Das Paper beschreibt deren Bestimmung durch die Messung der Sperrschichtkapazität in Durchlassrichtung von kommerziellen LEDs, da das eingebaute Schutzelement den Sperrbereich wesentlich beeinflusst.

1 Einführung

Die LED ist zurzeit aufgrund ihres universellen Leistungsspektrums die wichtigste Lichtquelle in der Beleuchtungstechnik, wodurch auch immer komplexere Anwendungsmöglichkeiten wie z.B. intelligenter Matrix-LED Scheinwerfer, HCL (human centric lighting) oder spektral angepasste Tier- und Pflanzenbeleuchtungen entstehen. Das Alterungsverhalten der LED ist für Anwender und Hersteller gerade im Bereich von komplexen Leuchten sehr wichtig, um das gewünschte Lichtspektrum über die ganze Lebensdauer der gesamten Leuchte zu garantieren. Die Änderung von Dotierungskonzentrationen gehört zum Degradationsverhalten der LED und hat große Auswirkungen auf ihre optischen Kenngrößen. Bei LEDs auf GaN-Basis ändert sich die Akzeptorkonzentration durch das Diffundieren des Akzeptors Magnesium in die aktive Zone [5]. Die zerstörungsfreie Bestimmung der Dotierungskonzentration erfolgt über die Messung der Sperrschichtkapazität in Abhängigkeit einer negativen Spannung [1, 2]. Die Methoden zur Erfassung von tiefen Störstellen wie z.B. DLTS arbeiten auch im Sperrbereich des pn-Übergangs. Allerdings sind diese Messungen bei kommerziellen LEDs aufgrund des integrierten Schutzelementes, welches im Sperrbereich wirkt, nicht möglich. Lassen sich die genannten Methoden auf den Durchlassbereich erweitern?

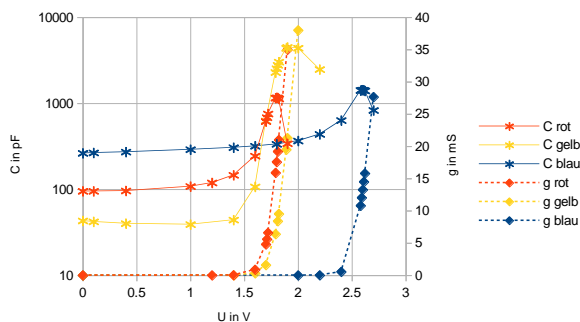


Abb. 1: Sperrschichtkapazität und Leitwert verschieden farbiger LEDs mit den jeweiligen Diffusionsspannungen ($U_{Drot} = 1,7 \text{ V}$, $U_{Dgelb} = 1,9 \text{ V}$ und $U_{Dblau} = 2,55 \text{ V}$)

In Durchlassrichtung ist die Messung der Sperrschichtkapazität durch die zusätzliche Wirkung der

Diffusionskapazität sehr schwierig. Eine gezielte Wahl verschiedener Betriebspunkte der LED in Durchlassrichtung ermöglicht eine getrennte Betrachtung der beiden Kapazitäten voneinander. Außerdem kann die Diffusionsspannung im Verlauf der Sperrschichtkapazität in Durchlassrichtung bestimmt werden, die direkt von den Dotierungskonzentrationen abhängt. Die Messergebnisse zeigen eine Änderung der Dotierungskonzentration in Abhängigkeit des Betriebsstromes und der Umgebungstemperatur während der Alterung.

2 Theoretische Grundlagen

Die Kapazität einer LED besteht aus der Summe von Diffusions- und Sperrschichtkapazität. Die Diffusionskapazität entsteht durch den Überschuss von Ladungsträgern an den Grenzen zur aktiven Zone und ist proportional zum Vorwärtsstrom. Die Sperrschichtkapazität C_s entsteht im thermodynamischen Gleichgewicht durch die Diffusion von Minoritätsladungsträger in die Majoritätsgebiete am pn-Übergang. Das Verhalten der Sperrschichtkapazität wird in der Literatur durch den Aufbau der LED allgemein mit dem Modell des Plattenkondensators beschrieben [2]. Sie hängt somit vom Abstand (Sperrschichtbreite b), der Fläche (Chipfläche A der LED), der Dielektrizitätszahl ϵ_r des Halbleiters und von der Donator- N_D und Akzeptorkonzentration N_A ab (Formel 1).

$$C_s = A \epsilon \epsilon_0 \sqrt{\frac{e}{2 \epsilon \epsilon_0} \frac{N_D N_A}{N_D + N_A} \frac{1}{\sqrt{U_D - U}}} = \frac{A \epsilon \epsilon_0}{b(U)} \quad (1)$$

$$\text{mit } U_D = m \frac{k_B T}{e} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} \quad (2)$$

Die Sperrschichtbreite b ändert sich wiederum mit angelegter Vorspannung U und hat in Folge des durch die Diffusion der Ladungsträger entstehenden E-Feldes die Diffusionsspannung U_D (Formel 2) als Parameter. Im leitenden Zustand existiert die Sperrschicht nicht mehr und somit sind auch die Sperrschichtbreite und -kapazität nicht mehr vorhanden. Laut Formel liegt mathematisch bei der Diffusionsspannung eine Polstelle der Sperrschichtkapazität. Allerdings steigt im realen Verlauf die Sperrschichtkapazität nicht ins Unendliche,

was auch eine unendliche elektrische Feldstärke zur Folge hätte, sondern der Verlauf strebt aufgrund der nicht mehr vorhandenen Sperrschicht gegen null. Der reale Verlauf der Sperrschichtkapazität hat bei U_D ein Maximum [3].

3 Messung

Die Messung der Kapazität wurde mit dem Präzisions-LCR-Meter HP 4284A durchgeführt. Das Ersatzschaltbild für die Messung ist ein Leitwert mit paralleler Kapazität (Messergebnis Abb. 1). Dies entspricht dem Ersatzschaltbild des Kleinsignalverhaltens einer LED, wobei die parallele Kapazität die Summe aus Sperrschicht- und Diffusionskapazität ist. Die Messung der Sperrschichtkapazität erfolgt durch die Überlagerung einer Gleichspannung mit einer Wechselspannung ($u_{\text{mess}} = \pm 20 \text{ mV}$, $f = 50 \text{ kHz}$). Die Gleichspannung betreibt die LED in einem bestimmten Betriebspunkt mit definierter Spannung und begrenztem Strom (maximal $100 \mu\text{A}$), damit die Diffusionskapazität vernachlässigbar ist. Dadurch kann die Sperrschichtkapazität im Durchlassbereich der U -Kennlinie (0 V bis größer U_D) untersucht werden.

4 Messergebnisse und Auswertung

In Abb. 1 sind deutlich die Diffusionsspannungen der jeweiligen farbigen LED im Maximum der Kapazität im Durchlassbereich zu erkennen und stimmen mit den Werten aus der Literatur überein ($U_{D\text{rot}} = 1,7 \text{ V}$, $U_{D\text{gelb}} = 1,9 \text{ V}$ und $U_{D\text{blau}} = 2,55 \text{ V}$). Der parallel zur Kapazität gemessene Leitwert entspricht dem Verlauf der U -Kennlinie. Außerdem zeigt er auch die jeweilige Diffusionsspannung der einzelnen farbigen LED und stimmt mit dem theoretischen Verlauf überein. Diese Messung ermöglicht eine zerstörungsfreie Beobachtung der Diffusionsspannung einer LED während der Alterung. Im Schnittpunkt der Ordinate gibt es keinen Sprung. Des Weiteren zeigen die Messungen eine proportionale Erhöhung der Kapazität in Abhängigkeit der Größe der Chipfläche. Dieses Verhalten entspricht dem angewendeten Modell des Plattenkondensators für den Aufbau der LED.

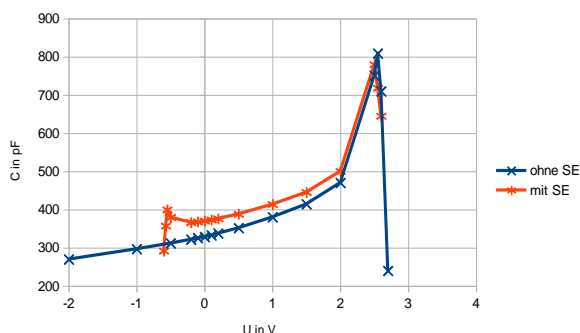


Abb. 2: Verlauf der Kapazität einer weißen LED mit und ohne Schutzelement (SE)

Die Messung zeigt außerdem die Diffusionsspannung der verschiedenen weißen LED Typen in einem Bereich von $2,5 \text{ V} - 2,6 \text{ V}$. Der Einfluss des

Schutzelementes ist deutlich im Sperrbereich erkennbar (Abb. 2) und hat das gleiche kapazitive Verhalten wie die LED in Durchlassrichtung allerdings mit einer geringeren Diffusionsspannung von ca. $0,65 \text{ V}$. Das eingebaute Schutzelement ist eine Zenerdiode mit einer Zenerspannung größer der maximalen Betriebsspannung der LED. Das Schutzelement erhöht den Verlauf der Kapazität der LED in Durchlassrichtung zusätzlich durch die Sperrschichtkapazität des Schutzelementes. Das Modell der Emitter-Kapazität von Gummel und Poon [4] kann den gemessenen Verlauf nachbilden. Dadurch kann ein korrigierter Ordinaten Abschnitt (C_0) mit den Werten um die Diffusionsspannung (ca. $\pm 0,5 \text{ V}$) berechnet werden und die Kapazität der LED für den Sperrbereich extrapoliert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Messdaten (Abb. 1 und Abb. 2) zeigen deutlich den Verlauf der Sperrschichtkapazität laut Literatur, da der Einfluss der Diffusionskapazität aufgrund der Wahl des Betriebspunktes der LED vernachlässigbar ist. Weiterhin kann mit Hilfe des Modells der Emitter Kapazität nach Poon und Gummel [4] der Verlauf angepasst werden, um den Einfluss des Schutzelementes zu vernachlässigen und für den Sperrbereich extrapoliert werden. Dadurch können die üblichen Methoden mit Hilfe der Steigung aus dem Elastanz-Quadrat die Donatorkonzentration N_D bestimmt werden. Mit Hilfe der Diffusionsspannung (gemessen im Verlauf der Sperrschichtkapazität) und der Donatorkonzentration N_D kann die Akzeptorkonzentration N_A berechnet werden. Die Messung der Sperrschichtkapazität in Durchlassrichtung ermöglicht die Beobachtung der Dotierungskonzentrationen während der Alterung im Betrieb durch eine zerstörungsfreie Methode. Außerdem sind somit Rückschlüsse auf verschiedene Alterungsmechanismen möglich. An dieser Stelle kann auch der Einfluss von tiefen Störstellen untersucht werden.

Literatur

- [1] K.-H. Cordes, „Bestimmen der Rekombinationsparameter aus Impedanzmessungen an pn-Übergängen in Silicium“, Dissertation, Braunschweig 1980
- [2] F. Thuselt, „Physik der Halbleiterbauelemente“, Springer, ISBN: 3-540-22316-9, 145-147, 2005
- [3] Chawla B. R., Gummel H. K., „Transition region capacitance of diffused p-n junctions“, IEEE Trans. Electron Devices (IEEE Transactions on Electron Devices), 18, 3, 178-195, 1971
- [4] Poon H. C., Gummel H. K., „Modeling of emitter capacitance“, Proc. IEEE (Proceedings of the IEEE), 57, 12, 2181-2182, 1969
- [5] Scherer M. A., „Prozesstechnologie für GaN-basierende Leuchtdioden“, Dissertation, Cuvillier Verlag Göttingen, ISBN 3-86537-105-1, 2004