

Additive Fertigung organischer Leuchtdioden

Christian Eder, Manuel Rank, Andreas Heinrich

Zentrum für optische Technologien, Hochschule Aalen

Organische Leuchtdioden (OLEDs) bieten neue Möglichkeiten Leuchtelemente herzustellen. In dieser Arbeit wird ein Ansatz zur additiven Herstellung von Polymer-OLEDs im Inkjet-Druckverfahren beschrieben. Das Ziel ist eine vollständig additiv gefertigte OLED mit organischer Anode und Flüssigmetallkathode auf ein ebenso additiv gefertigtes Harzsubstrat.

1 Einführung

OLEDs sind eine vielversprechende Alternative zu konventionellen halbleiterbasierenden Leuchtelementen [1]. Insbesondere im Bereich der Herstellung ergeben sich für OLEDs neue Möglichkeiten. So können per Inkjet-Druck (3D-Druck) individuell geformte Leuchtelemente auf Polymerbasis bei gleichzeitig geringem Materialverbrauch realisiert werden. Hierbei besteht die Möglichkeit der Integration auf 3D gedruckten optischen Elementen, um ein „komplett additiv gefertigtes Beleuchtungssystem“ zu realisieren. Alle kritischen Komponenten eines klassischen Systems sollen in einem monolithischen Design additiv fertigbar sein und dabei ähnliche Funktionalität aufweisen. Herkömmlicherweise werden OLEDs auf einer Indiumzinnoxid-Anode (ITO) aufgebracht. Als Kathodenmaterial wird beispielweise eine aufgedampfte Silberschicht verwendet [2]. In dem hier beschriebenen Ansatz werden Substrat und Elektroden durch additiv prozessierbare Materialien ersetzt. Hierbei ergeben sich Herausforderung hinsichtlich der elektromechanischen Kontaktierung der Halbleiterschichten, so wie der Benetzungseigenschaften und Oberflächenqualität der Schichten.

2 Inkjet Druck

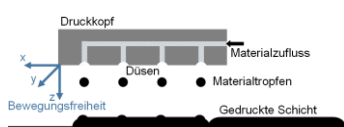


Abb. 1 Grundprinzip des Inkjet-Drucks mit drei Bewegungsfreiheitsgraden.

Das verwendete 3D-Druckverfahren ist der Inkjet-Druck. *Abb. 1* zeigt das Funktionsprinzip. Ein im Raum frei bewegbarer Druckkopf schreibt zeilenweise einzelne Materialschichten. Materialtropfen werden aus Düsen des Druckkopfs ausgestoßen und auf ein Substrat aufgetragen. Die Düsengröße ist auf ein Tropfenvolumen von 10 pL ausgelegt. Dieses Verfahren wird für die Herstellung von Substrat, Versiegelung und der Halbleiterschichten selbst verwendet. In dieser Arbeit wird das Inkjet-System DMP-2580 von Fujifilm verwendet. Es können funktionale Tinten in einem Viskositätsbereich von 2-30 cP verarbeitet werden. [3]

3 Konzept

Das Funktionsprinzip von an-/organischen Leuchtdioden basiert auf der Rekombination von Ladungsträgern in einer Emissionsschicht (EML). Entsprechend dem Bandlückenabstand der EML entstehen Photonen mit einer definierten Wellenlänge und spektraler Bandbreite [1]. Bei organischen Halbleitern entsteht eine Bandlücke durch differenzierte energetische Molekülzustände der Polymerketten. In *Abb. 2* ist der Aufbau einer vierlagigen OLED mit Elektroden skizziert. Innerhalb der organischen Schichten werden Elektronen über eine Elektronentransportschicht (ETL) über eine Lochblockierschicht (HBL) in die EML transportiert. Löcher werden über eine Lochinjektionschicht (HIL) in die EML injiziert. Bei der Rekombination von Elektronen-Loch-Paaren entsteht hier sichtbares Licht, das parallel zur Flächennormalen der Schicht austritt. Aufgrund der opaken Kathode aus Indiumgalliumar-

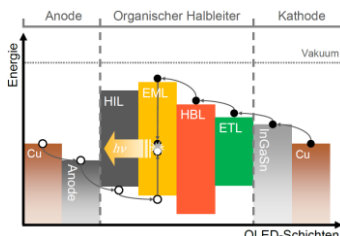


Abb. 2 Skizze der verwendeten OLED-Lagenstruktur mit der Polymeranode, Galinstankathode und den metallischen Kontaktstreifen aus.

senid (Galinstan) erfolgt die Extraktion von Licht durch die transparente Anode. Die in *Abb. 2* gezeigte Anode besteht in diesem Ansatz aus einer leitfähigen Polymerschicht auf PEDOT (Poly-3,4-ethyldioxythiophen)-Basis [4]. Die wässrige PEDOT-Suspension fungiert als ITO-Ersatz.

In *Abb. 3* ist der zugehörige strukturelle Aufbau gezeigt. Auf einem Inkjet-gedruckten Harzsubstrat wird die Polymeranode flächig aufgetragen. Dargestellt sind drei aktive Elemente im Schnitt. Auf der flächigen Anode befinden sich HIL, EML, HBL und ETL. Generell muss jede Schicht deckend sein und darf keine Fehlstellen aufweisen. Insbesondere ein kurzschlussfreies Auftragen der ETL ist kritisch für die Funktion der OLED. Um Kurzschlüsse zu vermeiden, wird eine Maske aus Harz aufgetragen und während des Herstellungsprozesses mit UV-

Strahlung ausgehärtet. Oberhalb der Maske und ETL befindet sich die Kathode aus der Flüssigmetaillegierung Galinstan. Die gemeinsame Anode und Galinstan-Kathode besitzen separate Verbindungen zu Kupferkontakten, welche zur Kontaktierung mit elektrischen Zuleitungen dienen. Die aktive Leuchfläche wird durch die Größe des Maskenausschnitts bestimmt.

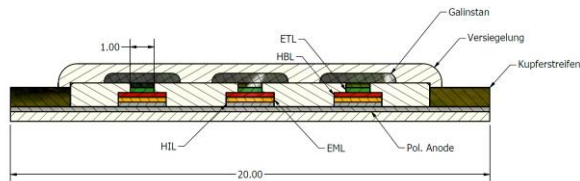


Abb. 3 Struktureller Aufbau eines OLED-Prüflings im Querschnitt, mit drei aktiven Leuchflächen. Längenangaben in mm.

4 Herausforderungen des Inkjet-Drucks



Abb. 4 Beispielhafte Druckfehler; Unzureichende Benetzung innerhalb einer Schicht (links); Düsenausfall des Drucksystems (rechts).

Durch das Inkjet-Drucksystem bedingt, können Fehlstellen innerhalb einer Schicht entstehen. In Abb. 4 sind beispielhaft typische Fehlerbilder gezeigt. Unzureichende Benetzungseigenschaften (links) der vorherigen Schicht kann zu inhomogenen, nicht funktionsfähigen, folgenden Schicht führen. Düsenausfälle (rechts), durch Eintrocknen oder Partikel im Düsenkanal führen zu einer eingeschränkten Funktion oder Kurzschlüssen über Schichten hinweg.

5 Ergebnisse

Die Charakterisierung der OLED erfolgt mittels einer Strom-Spannungs-Messung. Erwartungsgemäß zeigen die Messungen in Abb. 5 ein nicht lineares Verhalten des Betriebsstroms in Abhängigkeit der Flussspannung. Oberhalb der Schwellspannung geht die Kennlinie in eine lineare Funktion über. Die Steigung der Kennlinie ist abhängig vom ohmschen Widerstand,

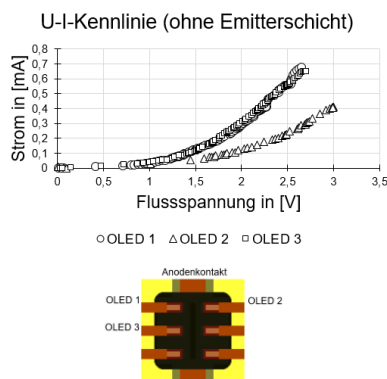


Abb. 5 Ergebnisse der Strom-Spannungscharakterisierung (oben) mit den zugehörigen Positionen auf dem Prüfling (unten).

Durch das Inkjet-Drucksystem bedingt, können Fehlstellen innerhalb einer Schicht entstehen. In Abb. 4 sind beispielhaft typische Fehlerbilder gezeigt.

Unzureichende Benetzungseigenschaften (links) der vorherigen Schicht kann zu inhomogenen, nicht funktionsfähigen, folgenden Schicht führen. Düsenausfälle (rechts), durch Eintrocknen oder Partikel im Düsenkanal führen zu einer eingeschränkten Funktion oder Kurzschlüssen über Schichten hinweg.

der durch Zuleitungswiderstände entsteht und letztendlich zur Quanteneffizienz der OLED beiträgt. Unterschiede der Zuleitungswiderstände werden durch Fehlstellen in der Polymeranode verursacht.

Eine weitere Charakterisierung erfolgt durch Bestimmung der spektralen Emissionseigenschaften. Die Ergebnisse sind in Abb. 6 (links) dargestellt und zeigen ein Emissionsmaximum zwischen 550 nm bis 600 nm. Da die erzeugte Emission durch Anode und HIL extrahiert werden muss, wird zusätzlich die Transmission von dem verwendeten PEDOT-Material bestimmt. Die Ergebnisse zeigen eine Transmission von ungefähr 97 % bei zwei Lagen über das Emissionsspektrum der EML hinweg. Hierbei entspricht eine Lage einer Schichthöhe von 500 nm.

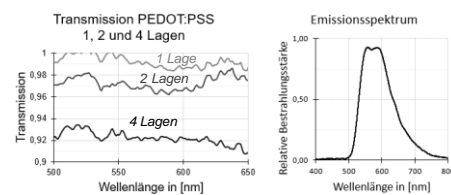


Abb. 6 Transmissionsmessung von PEDOT zur Bestimmung der Extraktion von Licht durch die Anode (links) und Messung des Emissionsspektrums der EML (rechts)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Bisherige Messungen zeigen, dass Polymer-OLEDs unter Verwendung des Inkjet-Druckverfahrens vollständig additiv gefertigt werden können. In Abb. 7 sind Bildaufnahmen des Funktionstests des Halbleiterstapels auf ITO (links) und einer OLED aus dem 3D-Drucker (rechts) dargestellt.

Noch kann nicht die komplette OLED-Fläche aktiv genutzt werden. Die erzeugte Leuchtdichte ist zu gering für Leuchtdichtemessungen. Prozessparameter werden optimiert, um höhere Leuchtdichten zu erzeugen und damit die Charakterisierung zu vervollständigen.

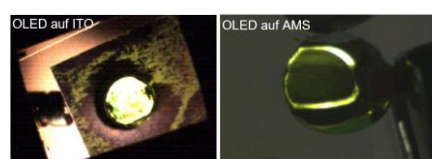


Abb. 7 Bildaufnahme der aktiven Leuchfläche einer Polymer-OLED auf ITO mit Polymeranode auf Glas (links) und einer OLED ohne ITO auf 3D-Drucksubstrat (AMS) (rechts).

Referenzen

- [1] A.Köhler, H. Bässler: „Electronic Processes in Organic Semiconductors“, (Wiley-VCH 2015), S. 1-5
- [2] C. Lee: „The Current Trends of Optics and Photonics“, (Springer 2015), Part 4
- [3] Dimatix Materials Printer DMP-2800 Series User Manual, FUJIFILM Dimatix, Inc., 2008
- [4] Heraeus Deutschland GmbH & Co. KG: Innovate with Clevios™, „heraeus.com“