

TCO-Schichten für OLED-Displays und Beleuchtungen

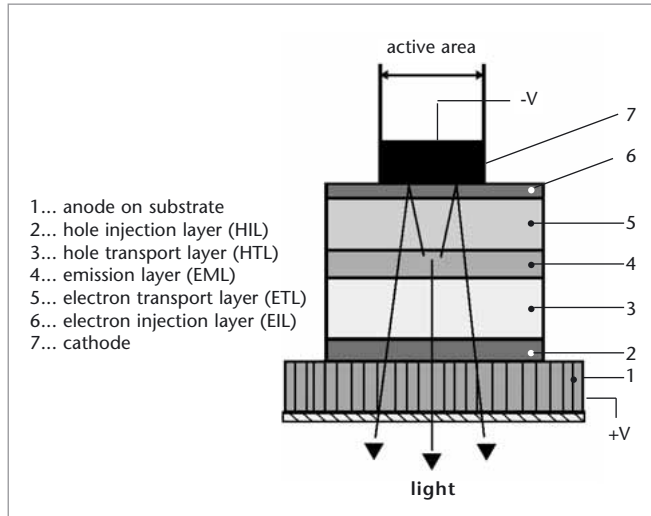
Organische Lichtemittierende Dioden (OLED) zeichneten sich in den letzten Jahren durch gigantische Entwicklungssprünge aus. Erste Produkte, vornehmlich im Displaybereich, sind bereits am Markt eingeführt. Am Fraunhofer IPMS wird eine industriennahe Technologie entwickelt, um OLED-Systeme der nächsten und darauffolgender Generationen zu fertigen. Gegenstand der Entwicklungen sind die notwendigen Fertigungs-, Systemintegrations- und Aufbauttechnologien. Neben dem Aufbau des organischen Schichtstapels kommt dabei den Kontaktschichten, von denen naturgemäß mindestens eine transparent sein muss, besondere Bedeutung zu.

Eine OLED besteht im einfachsten Aufbau aus einer organischen Schicht, die sich zwischen zwei Elektroden befindet. Als Anode werden häufig ITO-beschichtete Glassubstrate verwendet, die hinreichend leitfähig und im sichtbaren Spektralbereich transparent sind, so dass durch diese Elektrode das erzeugte Licht austreten kann. Wird an die Elektroden eine ausreichend hohe Spannung angelegt, werden Löcher aus der Anode in das höchste besetzte molekulare Orbital (HOMO - highest occupied molecular orbital) und Elektronen aus der Kathode in das niedrigste unbesetzte molekulare Orbital (LUMO - lowest unoccupied molecular orbital) der organischen Schicht injiziert. Innerhalb der Emissionszone relaxiert das Elektron-Lochpaar (Exziton) in den Grundzustand und emittiert Licht.

Ch. May
christian.may@
ipms.fraunhofer.de

F. Löffler
J. Amelung
Fraunhofer IPMS

Abbildung 1
Schematischer Aufbau
einer organischen
Leuchtdiode



Typischerweise bestehen organische Leuchtdioden aus drei bis fünf organischen Schichten, um die Ladungsträgerinjektion über die Elektroden sowie den Ladungsträgertransport innerhalb des organischen Schichtsystems zu optimieren (Abb. 1). Es existieren dabei zwei deutlich verschiedene Materialsysteme: im Vakuum aufzudampfende „kleine Moleküle“ (small molecules, SM-OLED) und Polymere, die aus der flüssigen Phase aufgebracht werden (Polymer-OLED, PLED). Das Fraunhofer IPMS konzentriert sich auf die Entwicklung von Technologien auf Basis der kleinen Moleküle. Diese Arbeiten ordnen sich in ein Netzwerk für organische Materialien und Systeme in Dresden ein, welches gemeinsam mit dem Institut für Angewandte Photo-physik (IAPP) der TU Dresden und der gemeinsamen Aus-gründung Novaled GmbH gebildet wird.

Kernpunkt der Arbeiten stellt die am IPMS installierte welt-weit erste vertikale Durchlaufbeschichtungsanlage VES400/13 (Applied Films, Abb. 2) für organische Leuchtdioden dar.

Auf Basis dieser Anlage werden neue Technologien für die Fertigung von organischen Leuchtdioden entwickelt [1,2]. Das lineare Durchführen von Substraten durch die Anlage sowie die Verwendung von Linienquellen verbessern die Taktzeit Materialausnutzung erheblich gegenüber konventionellen Clusteranlagen.

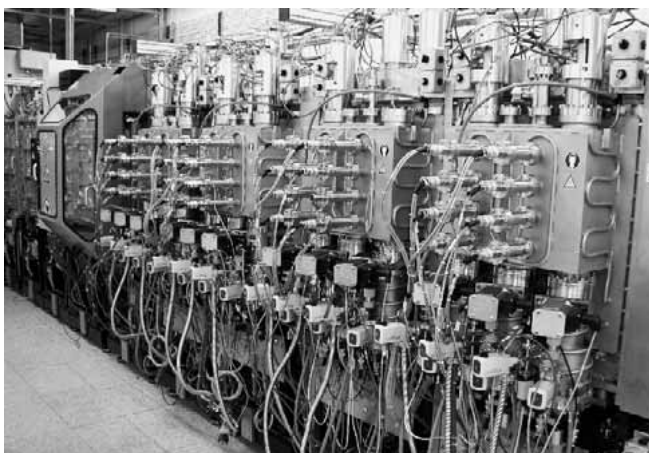


Abbildung 2
Vertikale in-line-Anlage
VES400/13 am IPMS
(Applied Films)

Diese in-line-Anlage verfügt über 13 Module und kann Substrate bis zu 300 x 400 mm² beschichten. Die Beladung der Substrate erfolgt über vorgelagerte Handschuhboxen mit N₂-Atmosphäre. Innerhalb der Anlage sind eine lineare Ionenquelle (LIS38, Advanced Energy), 2 Magnetronsputterkathoden, 2 lineare Metallverdampfer und 12 lineare Organikverdampfer verfügbar. Zusätzlich wurde in einer Handschuhbox ein Schattenmaskenjustagesystem (MRB Automation) installiert.

Inzwischen wurde der Prozess zur Darstellung der 3 Grundfarben in Bottomemission auf Basis hocheffizienter Emittierer und dotierten Transportsystemen installiert.

Die zur Zeit erzielten Resultate (*Tab. 1*) werden im Wesentlichen dadurch begrenzt, dass aus anlagentechnischen Gründen gegenwärtig keine n-Dotierung des Elektronenleiters und nur Magnesium als Deckelektrodenmaterial zur Verfügung stehen. Weitere Optimierungen des Schichtsystems sind in Arbeit.

Tabelle 1
 Status der am IPMS
 prozessierten OLED
 (Stand: April 2004)

CIE (x/y)	Stromeffizienz (cd/A) @ 100 cd/m ²	Betriebsspannung (V) @ 100 cd/m ²
0.68, 0.32 (Rot)	4,1	6,5
0.33, 0.61 (Grün)	22,8	4,5
0.15, 0.16 (Blau)	2,7	5,9

An die zu beschichtenden Substrate gibt es hinsichtlich der transparenten Elektrode dabei folgende Anforderungen:

- Hohe Transparenz
- Geringer spezifischer Widerstand
- Oberflächenrauigkeit besser 1 nm RMS
(sonst schädliche Feldstärkeüberhöhungen)
- Angepasste Austrittsarbeit an die Löchertransportschicht
- Gute Strukturierbarkeit
- Geringe Partikelkontamination

Indiumzinnoxid (ITO) ist dabei gegenwärtig das Material der Wahl. In der VES400/13 werden ITO-Schichten mit niedrigem Flächenwiderstand und geringer Oberflächenrauigkeit (< 1 nm RMS, Spitzen < 10 nm) durch RF überlagertes DC-Sputtern [3] auf Glassubstrate bei Substrattemperaturen von ca. 200 °C abgeschieden. Die Schichten haben bei einer Dicke von 150 nm einen Flächenwiderstand

von $8,4\ \Omega$ und weisen eine Transmission von 92 % (550 nm, ohne Substrat) auf. Nach der weiteren Prozessierung wie Strukturierung der ITO-Schicht und Aufbringen von Passivierungen und Abrisskanten aus Photolack werden die Substrate unmittelbar vor der Beschichtung mit den organischen Materialien in-situ einer Plasmavorbehandlung in einem Ar/O_2 -Plasma mit der linearen Ionenquelle unterzogen. Dabei wird neben dem Entfernen von potenziellen Lackrückständen eine positive Beeinflussung der ITO-Oberfläche festgestellt. Zwar erhöht sich der gemessene Flächenwiderstand leicht, aber gleichzeitig wird ein Poliereffekt und eine Erhöhung der Austrittsarbeit um ca. 0,5 eV beobachtet. Damit verbunden sind dann eine niedrigere Betriebsspannung, eine Erhöhung der Quanteneffizienz und somit eine Erhöhung der Lebensdauer.

Zusätzliche Anforderungen an die Anode ergeben sich aus der Größe der aktiven Fläche. In einem Testlayout mit einer aktiven Diodenfläche von $90 \times 10\ \text{mm}^2$ wurden für eine grüne pii-Diode auf einer $10\ \Omega_{\square}$ ITO-Anode beispielsweise ein Abfall der Leuchtdichte von ca. 40 % festgestellt. Dieser Spannungsabfall kann kompensiert werden, wenn unter die ITO-Schicht eine Metallschicht in gitterähnlicher Anordnung platziert wird. Mittels FEM-Simulation kann dabei ein



Abbildung 3
OLED-Symbol
 $50 \times 100\ \text{mm}^2$, rot mit
pii-Struktur, hergestellt
in der VES400/13
am IPMS.

Optimum aus Schichtdicke, Breite und Abstand der Gitterstäbe gefunden werden, die vom Auge nicht wahrgenommen werden und eine homogene Leuchtdichte ermöglicht. Damit ist es möglich, großflächige OLED zu realisieren, die zur Signalisierung oder zu Beleuchtungszwecken (Hintergrundbeleuchtung für LCD-Display oder Raumbelichtung) zukünftig Verwendung finden werden.

Während die bisherigen Ausführungen sich auf bottom emittierende Bauelemente beschränkten, wo der organische Schichtstapel auf die transparente Elektrode aufgebracht wird, soll im Folgenden auf top emittierende Bauelemente eingegangen werden. Hier muss die transparent leitfähige Elektrode auf dem organischen Schichtstapel abgeschieden werden. Top Emission ist dort erforderlich, wo kein transparentes Substrat zur Verfügung steht. Die wichtigste Anwendung dabei ist die Integration von OLED auf Aktivmatrix-Displaysubstraten. Durch den Flächenbedarf der Dünnschichttransistoren würde der OLED in Bottom-Emission nur ein geringer Flächenanteil zur Verfügung stehen, der durch entsprechend hohe Leuchtdichten kompensiert werden muss. Das wiederum führt zu einer Verkürzung der Lebensdauer. Also ist es das Ziel, die gesamte Pixelfläche für eine top emittierende OLED zur Verfügung zu stellen.

Dabei müssen jedoch bei der Abscheidung der transparenten Deckelektrode folgende Schädigungsmechanismen Beachtung finden:

- Substraterwärmung (Glastemperatur der verwendeten organischen Materialien teilweise bei nur 120 °C)
- Partikelbombardement, Ionen- und Elektroneneintrag
- UV-Strahlungsbelastung
- Sensitivität gegen Reaktivgase

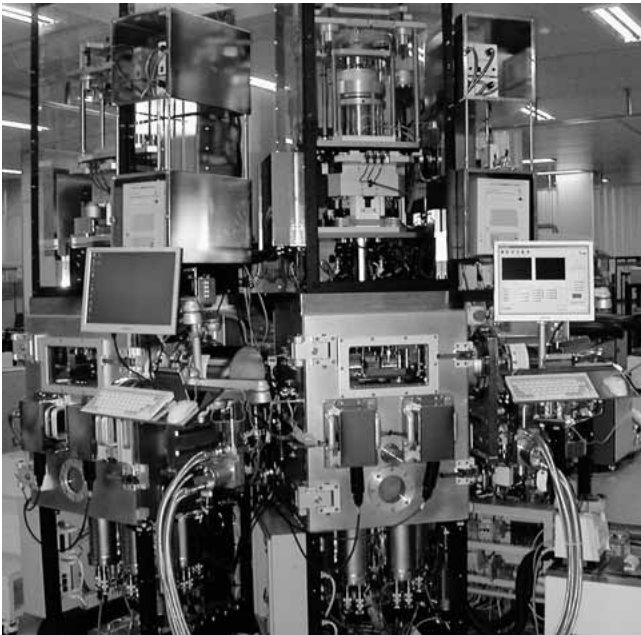


Abbildung 4
OLED-Clusterbeschichtungsanlage Sunicell Plus 200 (Sunic System) am IPMS

Wird die ITO-Schicht entsprechend des oben beschriebenen RF/DC-Prozesses auf kalten Substraten abgeschieden, wird in eigenen Versuchen ein Minimum des spezifischen Widerstands von $450 \mu\Omega\text{cm}$ gefunden. Durch die Verwendung von IMI- (Isolator-Metall-Isolator) Wechschichten können auch bei kalten Substraten Werte für Transmission und Widerstand erreicht werden, die denen heiß abgeschiedener Schichten ebenbürtig sind. Wegen seiner hohen Leitfähigkeit und der geringen Absorption im sichtbaren Bereich wird dabei Silber verwendet. Bedingt durch das starke Inselwachstum von Silberschichten gibt es eine starke Abhängigkeit der elektrischen und optischen Eigenschaften von der Silberschichtdicke. Für ein Schichtsystem ITO-Ag-ITO (30-10-30 nm) wird dabei eine Transmission von $> 90 \%$ (530 nm, ohne Substrat) und ein Flächenwiderstand von

$10 \Omega_{\square}$ erreicht. Diese Werte sind identisch für Silberschichten, die gesputtert wurden, zu Silberschichten, die über thermische Verdampfung abgeschieden wurden. Jedoch erfolgt bei Verwendung von Kathodenseparatoren eine Trennung nur für Silberschichten, die gedampft wurden.

Einen weiteren Ansatz, die Schädigung beim Sputtern zu reduzieren, stellt das „facing target“ Sputtern (auch mirror shape target sputtering, z. B. [4]) dar, wo ein Plasma zwischen zwei gegenüberliegenden Targets brennt und sich das Substrat außerhalb dieser Zone befindet. Durch die Verwendung eines starken magnetischen Felds werden akzeptable Beschichtungsraten erzielt. Gegenwärtig wird am Fraunhofer IPMS eine OLED-Clusterbeschichtungsanlage (Sunic System) installiert, die mit diesem System ausgestattet ist. In ersten Versuchen wird dabei in stationärer Beschichtung eines rotierenden Substrates ($200 \times 200 \text{ mm}^2$) ein spezifischer Widerstand von $600 \mu\Omega\text{cm}$ bei einer Beschichtungsrate von $0,5 \text{ \AA/s}$ erreicht. Eigene Versuche zur Applizierung dieser Schicht auf OLED stehen noch aus.

Die vorgestellten Ergebnisse entstanden innerhalb des Projekts OLEDFAB. Das Vorhaben wurde im Rahmen der Technologieförderung mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRA) 2000 - 2006 und mit Mitteln des Freistaates Sachsen gefördert.

Literatur

- [1] M. Schreil et al.: 10th Triennial ITG-Conference on Displays and Vacuum Electronics, 3./4. Mai 2004, Garmisch-Partenkirchen, (ITG-Fachbericht Band 183, p. 93).

- [2] M. Schreil et al.: Society for Information Display 2004 International Symposium, 23.-28. Mai 2004, Seattle, Washington, USA (Digest of Technical Papers, vol. XXXV, p. 1376).
- [3] A. Klöppel et al.: Society for Information Display 2000 International Symposium, 16.-18. Mai 2000, Long Beach, California, USA (Digest of Technical Papers, vol. XXXI, p. 1048).
- [4] H. K. Kim et al. : Appl. Phys. Letters 85 (2004) 4295.