

Organische LED – Lichtauskopplung und Lichtmanagement



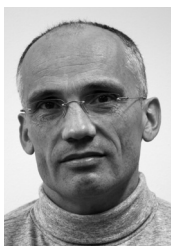
Norbert Danz



Dirk Michaelis



Michael Flämmich



Christoph Wächter



Sergey Kudaev

Einleitung

Organische Licht emittierende Dioden (OLED) /1/ sind neue Lichtquellen, bei denen die aktiven Materialien im Gegensatz zu LED aus dünnen Schichten organischer Polymere oder kleiner Moleküle bestehen. Dadurch sind preiswerte Herstellungstechnologien, wie z. B. das Drucken, denkbar. Eine Besonderheit der OLED liegt in den vielen Freiheiten bei der Gestaltung dieser Lichtquellen: Sie können auf flexiblen Substraten aufgebaut und auch transparent gestaltet werden. In Verbindung mit den geringen Dicken der aktiven Schichten sind völlig neuartige Lichtquellen mit einzigartigen Eigenschaften und Anwendungen bereits im Labor gezeigt worden. In kleinformigen Displays von Mobiltelefonen, Radios oder MP3-Playern wird die OLED-Technologie bereits kommerziell eingesetzt. Großflächige, effiziente OLEDs für Anwendungen zur Beleuchtung oder als Hinweisschilder sind Gegenstand der aktuellen Entwicklung und der Arbeiten am Fraunhofer IOF im Rahmen des BMBF-Projekts »HOBBIT«.

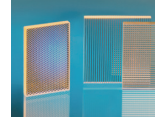
Aufgrund der optischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien wird nur ein kleiner Teil der emittierten Lichtenergie (~ 20 %) durch das Substrat in die Luft ausgekoppelt und steht dem Nutzer zur Verfügung. Etwa 60 % des Lichts wird in geführte Moden des Dünnschichtstapels emittiert, während die restlichen 20 % das Substrat aufgrund der Totalreflexion an der Substrat-Luft-Grenzfläche nicht verlassen können. Zusätzlich tritt bei diesen Lichtquellen starke stromabhängige Alterung auf. Demzufolge ist die Erhöhung des Anteils der in Luft abgestrahlten Energie von zentraler Bedeutung für die Effizienzsteigerung und Erhöhung der Lebensdauer.

Zur Steigerung der Lichtauskopplung werden verschiedene Ansätze verfolgt, wie die Optimierung des Dünnschichtstapels, die mikrooptische Strukturierung des Substrats, sowie die Einbeziehung von diffraktiven Strukturen in das OLED-Schichtsystem.

Homogenes Schichtsystem

Die Emission des aktiven Mediums im Inneren des Schichtstapels wird mit der Methode der Greenschen Funktionen simuliert /2/, wobei ein angeregter Zustand als Hertzscher Dipol modelliert wird. Bei Kenntnis der optischen Eigenschaften und Schichtdicken aller verwendeten Materialien ist so eine rigorose analytische Beschreibung der Emission möglich (Abb. 1).

Zusätzlich müssen weitere Eigenschaften des emittierenden Materials bekannt sein. Dies sind das intrinsisch emittierte Spektrum, die Verteilung der Rekombinationsrate in der aktiven Schicht, die Emissionsquanteneffizienz des angeregten Zustands sowie die Orientierungsverteilung der Dipolübergangsmomente. Fluoreszenzexperimente an dünnen Schichten mit optischer Anregung können diese Aussagen nur bedingt liefern, da alle vier Größen im elektrisch gepumpten Zustand des Systems bekannt sein müssen.



Introduction

Organic light emitting diodes (OLED) [1] are new light sources containing thin, layered active media made of small organic molecules or organic polymers. This enables for cost efficient fabrication technologies, such as printing. A distinctive feature of OLEDs is the range of freedom in the design of this light source: It can generally be set up on flexible substrates and be prepared in a transparent manner. Taking the small thickness of the OLED into account additionally, novel light sources comprising new properties and applications have been demonstrated at laboratory level. OLED technology is readily commercialized for small sized displays of radios, mp3-players or cellular phones. Large sized, efficient OLEDs for illumination and signage purposes are the object of current development and IOF research within the project "HOBBIT" funded by the German federal ministry of education and research (BMBF).

Due to the optical properties of the media involved, only a small part (~ 20 %) of the light generated inside the device is coupled out into the air and can be used. Approximately 60 % of light energy is emitted into guided modes of the thin film stack, while the remaining 20 % of radiation suffers from total internal reflection at the substrate-air-interface. Additionally, a strong current dependent aging of OLEDs is observed. Therefore, increasing the fraction of light coupled into the air plays a major role in both the efficiency and device lifetime enhancement. Different approaches are being conducted to increase the OLED outcoupling such as optimization of the planar stack, micro optical patterning of the substrate as well as the introduction of diffractive structures into the stratified system.

Homogeneous stratified system

The active medium's emission inside the OLED stack is simulated by means of the Green's function method [2], which models the excited state by a Hertz dipole. Knowledge of the optical properties and thicknesses of all media involved enables for rigorous analytical description of the system's emission (Fig. 1). But additional properties of the emitting material must be known, especially the intrinsically emitted spectrum, the spatial distribution of recombination rate inside the active layer, the quantum efficiency of emission, and the orientation distribution of the dipole transition momentum. Analysis of optically excited fluorescence in single thin films yields only limited results, because all four values should be known in electrically pumped operation.

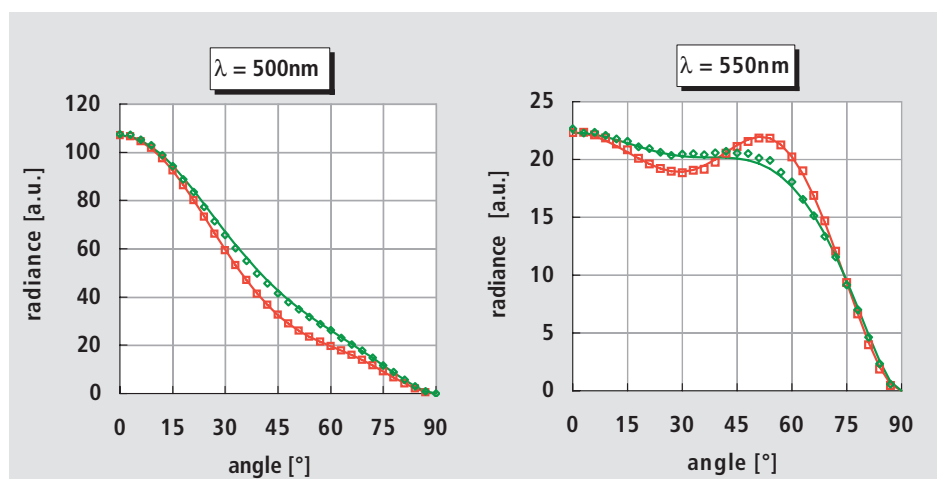


Abb. 1:
Gemessene (Punkte) und berechnete (Linien)
Abstrahlcharakteristik einer OLED für zwei
Wellenlängen und die beiden Polarisationen TE
(rot) sowie TM (grün).

Fig. 1:
Measured (points) and simulated (lines) radiation
pattern of an OLED at two wavelengths and the
two polarizations TE (red) and TM (green).

Gegenwärtig werden Methoden entwickelt, um diese Eigenschaften des aktiven Materials im Betrieb der OLED zu bestimmen. Mittels einer immersionsgekoppelten Halbkugel (Abb. 2) kann z. B. die Strahlung im Substrat beobachtet werden. Dieses Vorgehen liefert, verglichen mit der konventionellen Messung, zusätzliche Informationen aufgrund des größeren beobachteten Winkelspektrums.

Zusätzlich können spezielle OLEDs entworfen werden, um verschiedene Emittereigenschaften im Strahlungsfeld sichtbar zu machen. So ist die Emission senkrecht orientierter Dipolübergangsmomente in herkömmlichen, optimierten Systemen an Luft praktisch nicht sichtbar. Im Substratstrahlungsfeld (Abb. 2) oder in einer speziell veränderten OLED kann diese Emission beobachtet und damit auf die Orientierungsverteilung der Dipolübergangsmomente geschlossen werden /3/.

Strukturierte OLED

Die Verringerung der Verluste durch Totalreflexion an der Substrat-Luft-Grenzfläche kann durch mikrooptische Arrays an dieser Grenzfläche erreicht werden. Derartige Elemente haben dabei zwei Wirkungen: Einerseits kann Strahlung, die im Substrat unter großen Einfallswinkeln auf die Grenzfläche trifft, das Substrat verlassen. Dieser Effekt ist deutlich in Abb. 3 zu erkennen, in der an der Stirnfläche des Substratglases ohne Mikrolinsenarray die Substratstrahlung sichtbar ist. Andererseits tritt, unter Änderung des Ausbreitungswinkels, auch eine Rückreflexion zum OLED-Schichtsystem auf.

Der letztgenannte Effekt führt zu einer »Mischung« des Winkelspektrums der Substratstrahlung und damit zu einem sogenannten »Light Recycling«, da zurück gestreutes Licht nach Reflexion am aktiven Schichtsystem wieder auf die Grenzflächenstruktur trifft und nun eventuell das System verlassen kann.

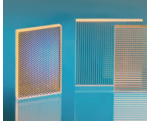
Die Simulation dieser Effekte muss auf zwei Modellen aufbauen: Einer rigorosen, wellenoptischen Beschreibung der Emission und der Reflexion des Dünnschichtstapels, sowie einer Berechnung des Mikroarrays durch nichtsequentielle Strahlverfolgung. Die Optimierung einer OLED für eine gegebene Auskoppelstruktur führt dann sowohl zu einem angepassten Strahlungsfeld im Substrat als auch zu einer Schichtstruktur bestmöglicher Reflexion. Demzufolge kann ein homogenes System auf ein Mikroarray optimiert und dadurch weiter verbessert werden.

Abbildung 3 zeigt eine Farbveränderung der OLED-Abstrahlung zwischen homogenem und strukturiertem Bereich. Dieser Effekt kann teilweise mit der Winkel- und einer damit einhergehenden spektralen Mischung im Substrat erklärt werden. Andererseits führt der Cut-off geführter Moden im langwelligen Bereich zu mitunter großen spektralen Effekten im Substratstrahlungsfeld /4/.

Abb. 2:
Beobachtung des Strahlungsfelds einer OLED im Substrat durch eine immersionsgekoppelte Halbkugel.

Fig. 2:
Observation of the OLED's substrate radiation pattern using an immersion coupled half ball lens.





Methods to determine these properties of the OLED's emitting material are currently being developed. As an example, the radiation pattern inside the substrate can be measured using an immersion coupled half ball lens (Fig. 2). Compared to a conventional approach, this yields additional information due to the increased angular range being analyzed. Furthermore, certain devices can be designed to visualize different emitter properties in the device radiating pattern. One example is the emission of perpendicularly oriented transition dipole moments that practically do not emit into the air. Upon analyzing the substrate radiation or the air radiation in the case of an especially designed OLED, that emission becomes accessible to gain knowledge about the orientation distribution of transition dipole moments /3/.

Patterned OLED systems

Losses due to total internal reflection at the substrate-air-interface can be reduced by introducing micro optical structures at this interface. These elements yield a twofold effect: First, radiation that hits the interface with a large angle of incidence can now leave the substrate. This effect is clearly seen in Fig. 3 where substrate radiation is apparent at the edge of the substrate without microlens array. Second, back reflection towards the OLED stack will occur in connection with a change of the propagation angle. This yields a mixing of the substrate radiation angular spectrum and thus a so-called light recycling, because back reflected light might leave the substrate after a subsequent reflection at the active OLED stack.

The simulation of micro patterned substrates must rely upon two models: A rigorous, wave optical description of emission and reflectivity of the thin film system and a non sequential ray tracing calculation of the combined OLED and micro structure system. The optimization of an OLED stack onto a given micro structure will lead to a well adapted substrate radiation pattern as well as to a stack with highest possible reflection. According to this consideration, a homogeneous system can be optimized onto a given micro array and thus can be further improved.

Figure 3 illustrates a slight color shift of the OLED emission when comparing the homogeneous and the micro patterned area. This effect can be explained partially by the angular and an associated spectral mixing during light recycling in the substrate. But the cut-off of thin film guided modes in the long wavelength range might yield enormous spectral effects in the substrate radiation pattern /4/.

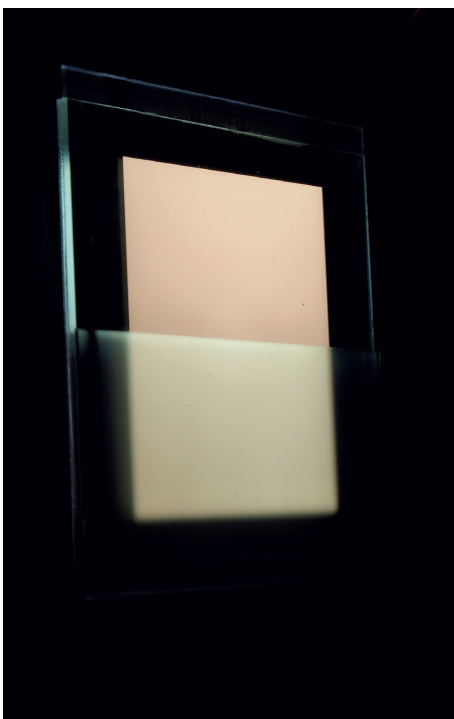


Abb. 3:
Weiße OLED (Merck KGaA, Mainz), die in der unteren Hälfte mit einem Mikrolinsenarray (IOF) versehen ist. Ohne die Mikrostruktur ist in der oberen Hälfte der Stirnfläche deutlich die Substratstrahlung zu erkennen.

Fig. 3:
White emitting OLED (Merck KGaA, Mainz) covered by an microlens array (IOF) in the lower half area. Substrate radiation is apparent without the micro structure at the substrate edge in the top left of the image.

Der bedeutendste optische Verlustkanal in einer OLED sind geführte Moden des Dünnschichtsystems /5/ und darunter insbesondere die starke Anregung eines TM-polarisierten Oberflächen-Plasmon-Polaritons an der Grenzfläche zum Metall. Dieser Effekt kann durch lateral strukturierte Schichtsysteme, also Gitter oder photonische Band-Gap-Strukturen, verringert werden. Neben dem enormen Herstellungsaufwand sind bei solchen Anordnungen wiederum zwei Effekte zu beachten:

- Erstens wird das Strahlungsfeld der Emitter gegenüber dem homogenen System infolge der Ankopplung an ursprünglich gebundene Moden mitunter stark modifiziert.
- Zweitens tritt auch hier – durch Beugung bei der Reflexion am Dünnschichtstapel – eine Mischung des Winkelspektrums im Substrat analog zur Wirkung einer strukturierten Substrat-Luft-Grenzfläche auf.

Die Simulation solcher Strukturen beruht auf der Verallgemeinerung des im homogenen System angewendeten Algorithmus, wobei die Gitterwirkung mittels »Rigorous Coupled Wave Analysis« (RCWA) berechnet wird. Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Wirkung einer Gitterstruktur.

Zusammenfassung

Die Simulation der optischen Effekte in einer OLED zeigt ein großes Potenzial auf, um die Effizienz dieser neuartigen Lichtquellen, und damit auch deren Lebensdauer, zu steigern. Neben dieser Aufgabe besteht die Möglichkeit, großflächige Lichtquellen mit einem auf die Anwendung angepassten Strahlungsfeld durch Kombination mit entsprechenden mikrooptischen Systemen herzustellen. Damit kann, abhängig vom OLED System, die Lichtausbeute in Vorwärtsrichtung um bis zu 100 % gesteigert werden. Beispielhaft ist in Abb. 5 das Ergebnis der Wirkung von zwei gestapelten mikrooptischen Arrays gezeigt, die eine stark gerichtete Emission der OLED bewirken.

Am Fraunhofer IOF werden geeignete Simulationstools entwickelt, die optischen OLED-Eigenschaften charakterisiert sowie angepasste Auskoppel- und Strahlformungsoptiken technologisch realisiert.

Literatur:

- /1/ Kalinowski, J.: Organic Light-Emitting Diodes, Marcel Dekker, New York, 2005.
- /2/ Danz, N.; Waldhäusl, R.; Bräuer, A.; Kowarschik, R.: Dipole lifetime in stratified media, J. Opt. Soc. Am B 19 (2002) 412.
- /3/ Flämmich, M.; Danz, N.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Gather, M.C.; Meerholz, K.: In situ determination of dipole emitter orientation in organic light emitting diodes, ECOER 2007 Conference, 1.–4. October 2007, Varenna, Italy.
- /4/ Danz, N.; Flämmich, M.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Pflumm, C.; Fiebranz, B.; Voges, F.: Anomalous colour shift of OLED-substrate radiation due to bound modes, ECOER 2007 Conference, 1.–4. October 2007, Varenna, Italy.
- /5/ Danz, N.; Michaelis, D.; Wächter, C.: Light extraction from OLEDs – the waveguide perspective, Proc. SPIE 6475 (2007) 64750J.

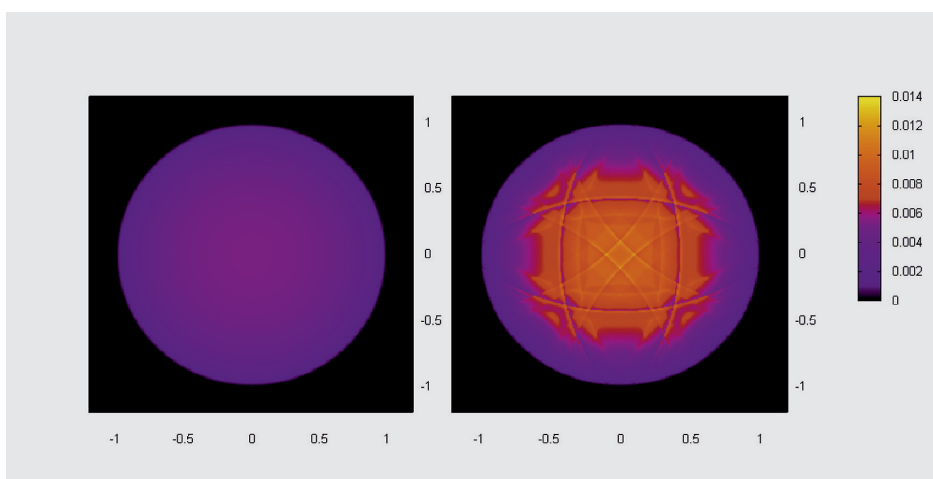
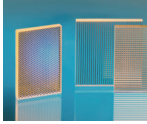


Abb. 4: Emission einer homogenen OLED (links) und einer OLED mit 2D Gitter im Dünnschichtsystem (rechts) in Abhängigkeit der Richtungskosinus der Lichtausbreitung in Luft.

Fig. 4: Emission of a homogeneous OLED (left) and an OLED comprising a 2D grating inside the thin film stack (right) depending on the direction cosines of propagation in air.



The most important optical losses inside an OLED are thin film guided modes /5/, and following this especially the excitation of a TM-polarized surface plasmon polariton guided at the metal interface. This effect can be decreased by using laterally patterned systems such as gratings or photonic band gap structures. Besides the expense of preparing such structures, two effects need to be considered again:

- First, the emitters' radiation pattern is now coupled to the originally bound modes and might be modified considerably compared to the homogeneous system.
- Second, similar to the effect of a patterned substrate-air-interface, angular mixing inside the substrate occurs due to the diffracted reflection at the OLED stack.

The simulation of such structures is based upon a generalization of the algorithm applied for homogeneous systems, introducing the grating diffraction via „Rigorous Coupled Wave Analysis“ (RCWA). An example of a grating's effect is given in Fig. 4.

Conclusions

The modeling of optical effects inside OLED systems shows large potential to enhance the efficiency, and correspondingly the lifetime, of these novel light sources. Besides this task, the radiation pattern of large area light sources may be shaped according to an intended application by combining the OLED with an appropriate micro optical system. In result, the light extraction efficiency perpendicular to the system can be increased by up to 100 % depending on the system.

Figure 5 depicts the effect of two stacked micro optical arrays as an example, where a strongly directed OLED emission has been reached.

Within this background, the IOF develops appropriate simulation tools, characterizes the optical properties of OLEDs, and technologically prepares optical elements for radiation coupling and pattern shaping.

References:

- /1/ Kalinowski, J.: Organic Light-Emitting Diodes, Marcel Dekker, New York, 2005.
- /2/ Danz, N.; Waldhäusl, R.; Bräuer, A.; Kowarschik, R.: Dipole lifetime in stratified media, J. Opt. Soc. Am B 19 (2002) 412.
- /3/ Flämmich, M.; Danz, N.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Gather, M.C.; Meerholz, K.: In situ determination of dipole emitter orientation in organic light emitting diodes, ECOER 2007 Conference, 1.–4. October 2007, Varenna, Italy.
- /4/ Danz, N.; Flämmich, M.; Michaelis, D.; Wächter, C.; Pflumm, C.; Fiebranz, B.; Voges, F.: Anomalous colour shift of OLED-substrate radiation due to bound modes, ECOER 2007 Conference, 1.–4. October 2007, Varenna, Italy.
- /5/ Danz, N.; Michaelis, D.; Wächter, C.: Light extraction from OLEDs – the waveguide perspective, Proc. SPIE 6475 (2007) 64750J.

Abb. 5: Gemessenes Strahlungsfeld einer OLED, die mit einer Primäroptik zur Lichtauskopplung aus dem Substrat und einer Sekundäroptik zur Formung der Abstrahlcharakteristik versehen ist.

Fig. 5: Experimentally determined radiation pattern of an OLED comprising two micro optical arrays, one to increase substrate radiation outcoupling and a second one to shape the far field emission pattern.

