

OLEDs und organische Elektronik auf dem Vormarsch

Breitere Anwendungen dank verbesserter Ladungsträger-Injektion und erhöhter Effizienz

●▶ Organische Leuchtdioden, kurz OLEDs, sind heutzutage in einigen mobilen Displayanwendungen anzutreffen und auch der erste OLED-Fernseher ist schon auf dem Markt erhältlich. Dank der kontinuierlichen Effizienzsteigerung der OLEDs in den letzten Jahren, die auch durch Redoxdotierung der organischen Materialien ermöglicht wurde, werden OLEDs zukünftig jedoch auch in der Wohnbeleuchtung eine Alternative zur traditionellen Glühlampe bieten. Die Redoxdotierung könnte aber auch anderen organischen Halbleiterbauelementen zum Durchbruch verhelfen.

OLED-Displays auf dem Vormarsch

Das Vertrauen der Display- und Beleuchtungsindustrie in die OLED-Technologie ist ungebrochen. In Zeiten, in denen täglich negative Wirtschaftsnachrichten die Schlagzeilen bestimmen, ist das allein schon eine sehr erfreuliche Meldung. Doch wie äußert sich dieses Vertrauen? Zum Beispiel ganz einfach durch die Tatsache, dass in den letzten Tagen und Wochen wieder eine Reihe neuer Produkte mit OLED-Displays auf den Markt gebracht wurden: Mobiltelefone von Nokia, SonyEricsson, Samsung, LG und Toshiba, ein Foto-Player von iRiver, eine Digitalkamera von Samsung – die Reihe ließe sich beliebig fortsetzen.

Die OLED Community frohlockt: Endlich ist es soweit – kontrastreiche und farb-brillianten Aktiv-Matrix-OLEDs finden ihren Weg in unsere Wohnzimmer, Büros und Autos. Es hat länger gedauert als erwartet. Bereits Mitte der 80er Jahre wurde die OLED in den Laboren von Kodak erfunden. Ende der 90er gab es das erste kommerziell erhältliche OLED-Produkt – ein Pioneer-Autoradio – im Elektronikfachmarkt zu kaufen. Seitdem kamen mehr und mehr Passiv-Matrix-OLED-Displays in tragbaren Produkten zum Einsatz. So sind heutzutage circa ein Drittel aller MP3-Spieler mit OLED Displays ausgerüstet.

▶ DIE AUTOREN

JAN BIRSTOCK

Jan Birstock studierte Physik an den Universitäten in Leipzig und Edinburgh. Er promovierte an der Universität Erlangen Nürnberg auf dem Gebiet Werkstoffwissenschaften. Nach drei Jahren bei der Siemens AG, in denen er an Polymer LEDs forschte, wechselte er 2003 zu Novaled. Dort war er drei Jahre lang Leiter der Physikgruppe. Seit 2006 ist er als Vice President Technology verantwortlich für Kundenprojekte und Entwicklungsarbeiten.



ANDREAS HALDI

Andreas Haldi studierte Interdisziplinäre Naturwissenschaften an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich. Nach der Diplomarbeit am Optical Sciences Center an der University of Arizona (USA), promovierte er am Georgia Institute of Technology (USA) auf dem Gebiet der organischen LEDs. Seit 2008 arbeitet er bei Novaled, wo er bei der Entwicklung von effizienten weissen OLEDs mitwirkt.



Novaled AG
Tatzberg 49
01307 Dresden
Tel.: +49 (0)351 796-580
Fax: +49 (0)351 796-5829
E-Mail: info@novaled.com.com
www.novaled.com

Doch in solchen Passiv-Matrix-Anwendungen kommen die Vorzüge der OLEDs gar nicht voll zum Tragen, da die einzelnen Pixel immer nur kurz bei relativ hohen Leuchtdichten angesteuert werden müssen. Außerdem ist die Produktionsgröße von Passiv-Matrix Displays sehr limitiert. Erst in Aktiv-Matrix-Displays (AMOLEDs) wie dem 11" Sony Fernseher XEL-1 offenbart sich die atemberaubende Bildqualität der OLED Technologie. Man nimmt heute an, dass sich bis zum Jahr 2012 die Umsätze mit AMOLEDs auf über 2 Milliarden US\$ belaufen werden, während die Umsätze im Bereich Passiv-Matrix-OLEDs eher stagnieren werden.

Hohe Effizienzen durch Dotierung

Dass OLEDs im heftig umkämpften Displaymarkt jetzt endlich eine bessere Position beziehen können, verdanken sie neben der guten Farbdarstellung auch dem sehr hohen Kontrast. Ihr vergleichsweise geringer Stromverbrauch bei anwendungstypischen Leuchtdichten macht OLEDs ebenfalls zu einer begehrten Alternative zu herkömmlichen Displays und Leuchtmitteln.

Die ersten OLEDs waren wesentlich ineffizienter als klassische Lichtquellen. Die Einführung der Redoxdotierung von organischen Schichten trug allerdings maßgeblich dazu bei, dass OLEDs heute zu den

effizientesten Lichtquellen gehören. Ähnlich wie in inorganischen Bauelementen wird dabei ein organischer Halbleiter mit Molekülen dotiert, die entweder Elektronen abgeben oder annehmen können. Dadurch werden Ladungsträger generiert, die sich dann ohne große Energieverluste im Halbleiter bewegen können. Dotierte Schichten werden deshalb in OLEDs als Transport-schichten zwischen den elektrischen Kontakten und der Lichtemissionszone eingesetzt. Auf diese Weise kann der Kontaktwiderstand in der OLED so stark verringert werden, dass beinahe die gesamte hineingesteckte elektrische Energie in Licht umgewandelt werden kann, was zu sehr hohen Effizienzen führt.

OLEDs mit solch dotierten organischen Schichten an den Kontakten werden auch PIN OLEDs genannt, da die organischen Schichten an den Kontakten p- oder n-dotiert sind, während die Lichtemissionszone intrinsisch (oder undotiert) ist. Basierend auf der PIN Technologie konnte Novaled z. B. grüne OLEDs mit einer Leuchtstärke von 183 lm/W bei 1000 cd/m² realisieren (Abbildung 1). Diese Dioden sind damit sogar effizienter als farbige LEDs. Es erstaunt deshalb auch nicht, dass dotierte organische Halbleiterschichten heute standardmäßig benutzt werden.

Weißer OLEDs zur Beleuchtung

Der Displaymarkt ist jedoch nur ein Standbein für OLEDs. Der Beleuchtungsmarkt (Abbildung 2) wird ebenso wichtig, wenn nicht sogar noch bedeutender werden. Momentan sind zwar noch keine Beleuchtungsprodukte mit OLEDs im Handel erhältlich, doch zahlreiche Firmen arbeiten mit Hochdruck daran, das zu ändern; allen voran die Schwergewichte Osram, Philips und General Electrics. Ein erstes Beispiel für eine OLED-Lampe ist das Design-Kunstwerk „Early Future“ (Abbildung 3), das Osram in Kooperation mit Ingo Maurer in sehr begrenzter Stückzahl auf den Markt gebracht hat.

Um in Zukunft OLEDs für Beleuchtungszwecke auch dem allgemeinen Publikum zugänglich zu machen, haben sich Philips, Osram und Novaled auf europäischer Ebene mit elf weiteren europäischen Firmen und Universitäten im EU-Forschungsprojekt OLED100.eu zusammengeschlossen. In diesem Projekt wird einerseits gleichzeitig an der Verbesserung der Effizienz, der Lebensdauer und der Größe der heutigen weißen OLEDs gearbeitet. Andererseits werden aber auch neue Prozesse entwickelt, mit denen OLED Platten von 1 m² für 100 € oder weniger hergestellt werden können.

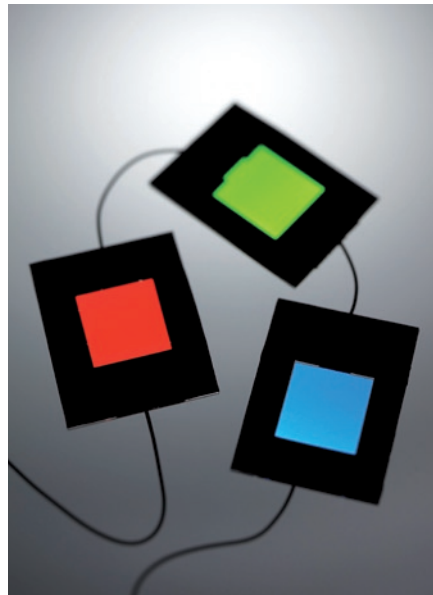


ABB. 1: Rote, grüne und blaue OLEDs.

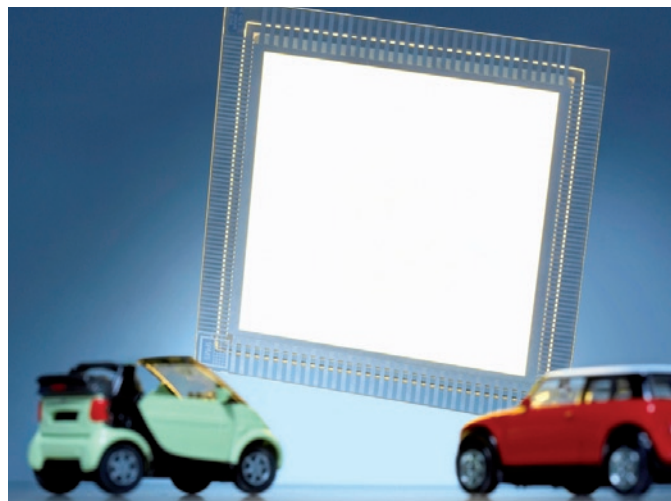


ABB. 2: Hocheffiziente weiße OLED.

Man darf davon ausgehen, dass die OLED Technologie insgesamt den Beleuchtungsmarkt revolutionieren wird. Die klassische Trennung in „Lichtquelle“ (z. B. Glühlampe) und „Beleuchtungskörper“ (z. B. Lampenschirm) wird fallen, da die OLED beide untrennbar miteinander verbindet. Dadurch werden Firmen, die momentan im reinen Luminaire Markt aktiv sind, gezwungen, sich auch mit der Herstellung der OLED-Lichtquelle zu beschäftigen.

Es gibt drei entscheidende Vorteile, die OLEDs für Beleuchtungsanwendungen so attraktiv machen. Da ist zunächst ihre hohe Effizienz. Zwischen 50 und 100 lm/W wurden bereits in verschiedenen Unternehmen in Europa und den USA erreicht, was nahe an der Effizienz von Leuchtstoffröhren liegt. Dazu kommt die beeindruckende Farbtreue der weißen OLEDs. Mit einem Color Rendering Index von über 90 sind OLEDs schon ganz nah am Sonnenlicht. Und

• DIE FIRMA

Novaled AG

Dresden

Novaled AG ist ein weltweit führender Technologieanbieter im Bereich OLED und Organische Elektronik. Neben seinen eigenen patentrechtlichen geschützten Materialien, die für OLEDs mit der Novaled PIN Technologie gebraucht werden, vertreibt Novaled auch kundenspezifische Produktlösungen an Display- und Beleuchtungshersteller. Zusätzlich fertigt Novaled auch Prototypen und Kleinserien von Produkten, um Kunden den Einstieg in den wachsenden Markt zu erleichtern.

www.novaled.com

schliesslich ihre lange Lebensdauer: Novaled erreichte unlängst eine Rekordlebensdauer für eine weiße OLED von 100.000 Stunden, das entspricht 10 Jahren Dauerbetrieb. Man spricht daher auch gern von einer „Mount-and-forget“ Technologie. Einmal einbauen, nie wieder darum kümmern.

Gestapelte OLEDs

Einer der aktuell vielversprechendsten Ansätze für weiße OLEDs mit hohen Effizienzen und langen Lebensdauern sind sogenannte gestapelte OLEDs. Da PIN OLEDs in ihrer Struktur mit einer hochdotierten p-Schicht beginnen und mit einer hochdotierten n-Schicht enden, können sie direkt aufeinander gestapelt werden, ohne dass eine Zwischenschicht nötig wird. Dabei bildet der Kontakt zwischen der n- und der p-Schicht einen pn-Übergang, in dem La-



ABB. 3: Early Future – ein Design-Kunstwerk von Ingo Maurer mit OLEDs von OSRAM
(Quelle: Ingo Maurer/OSRAM)

ABB. 4: Traditionelle OLED (a) und gestapelte OLED (b). Die Breite der Pfeile entspricht dem Strom, der gebraucht wird, um die gleiche Leuchtdichte für beide OLEDs zu erhalten.

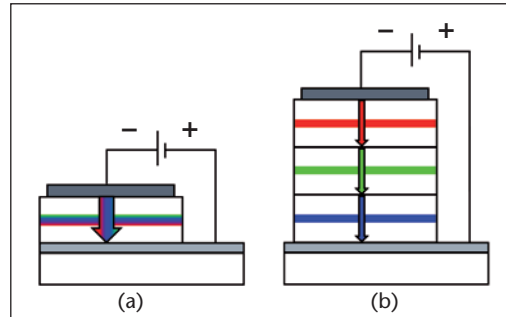


ABB. 5: Organische Solarzellen von Heliatak GmbH betreiben einen Ventilator.

dungsträger für die zwei benachbarten PIN OLEDs generiert werden. Weißes Licht kann dann durch das Stapeln einer roten, einer grünen und einer blauen Einheit erreicht werden [1]. Der offensichtlichste Vorteil solcher gestapelten OLEDs ergibt sich für ihre Lebensdauer. Während traditionelle PIN OLEDs für eine nützliche Leuchtdichte relativ viel Strom benötigen, weil alles Licht in einer OLED-Einheit erzeugt werden muss, braucht die gestapelte OLED nur gerade ungefähr einen Drittel dieses Stroms, wodurch die elektrische Belastung für das Bauelement kleiner wird und sich die Lebensdauer erhöht (Abbildung 4).

Eine gestapelte weiße OLED lieferte dann auch den finalen Meilenstein des EU-Projektes OLLA. Diese OLED hatte eine Leuchtdichte von 50,7 lm/W bei 1000 cd/m² und die erwartete Lebensdauer bei 1000 cd/m² lag bei über 10.000 Stunden. Das Emis-

ionsspektrum hatte einen CRI von 90, wobei 100 dem Sonnenlicht entsprechen würde.

Prozessierung p-dotierter Lochtransportschichten aus der Lösung

Heutzutage werden OLED-Produkte grundsätzlich auf Glasplatten gebaut. Dieses Substrat bietet sich an, da das Glas für das ausgehende Licht transparent ist und Gläser mit einer sehr kleinen Rauigkeit produziert werden können. Die letztere Eigenschaft ist für die Fabrikation von OLEDs von großer Bedeutung, da eine typische OLED nur gerade ungefähr 100 nm dick ist, und sich bei einer größeren Rauigkeit Kurzschlüsse bilden könnten. Für zukünftige Anwendungen wie flexible Displays oder Beleuchtungspanels wären allerdings auch andere Substrate, wie z.B. Metallfolien, von Interesse. Da solche Substrate jedoch rauer sein können,

muss man für die Prozessierung eine Methode finden, mit der Unebenheiten planarisiert werden können, wobei die Kontaktierung der OLED über das Substrat erhalten werden muss.

Eine gute Planarisierung kann mit Lochtransportschichten erreicht werden, die aus der Lösung prozessiert werden können. Außerdem sind die Kosten für eine solche Behandlung niedriger, da der Prozess nicht im Vakuum stattfinden muss. Das typische Lochtransportmaterial, das im Nassprozess aufgetragen wird, ist PEDOT:PSS, welches vor allem für Polymer-OLEDs regelmäßig benutzt wird. PEDOT:PSS hat jedoch den Nachteil, dass es eine wasserbasierte Lösung mit hohem Säuregehalt ist, was eine erschwerte Prozessierung zur Folge haben kann.

Als Alternative dazu können auch Lösungen der anfangs erwähnten dotierten Lochtransportschichten zu diesem Zweck verwendet werden. Kürzlich konnte gezeigt werden, dass die normalerweise verdampften niedermolekularen Substanzen (small molecules) aus der Lösung prozessiert werden können, ohne dass dabei Eingeständnisse in der Effizienz oder der Lebensdauer gemacht werden müssen, obwohl allgemein erwartet wird, dass polymer-basierte Lösungen zur Prozessierung von Lochtransportschichten vorteilhaft sein müssten. Eine Lochtransportschicht bestehend aus den standardmäßig verdampften Materialien hat außerdem eine höhere Leitfähigkeit und eine höhere Transparenz als eine PEDOT:PSS Injektionsschicht. Entgegen dem allgemeinen Bedenken, dass nur Polymer-Lösungen diese Stabilität erreichen können, kann auch gezeigt werden, dass dies auch für Lösungen solcher niedermolekularen Substanzen gilt.

Weitere Anwendungen für dotierte organische Halbleiter

Ausser in OLEDs sind dotierte organische Halbleiter allerdings auch in anderen Anwendungen von Bedeutung. So können zum Beispiel gestapelte PIN Dioden auch in organischen Tandem-Solarzellen eingesetzt werden. Dort können in den einzelnen Einheiten verschiedene Spektralbereiche des Sonnenlichts in Strom umgewandelt werden, um eine möglichst hohe Effizienz der Solarzelle zu erhalten. Dabei ermöglichen die dotierten organischen Schichten einen beinahe widerstandslosen Transport von der Absorptionsschicht zu den Elektroden und minimale Kontaktwiderstände sowohl an den Grenzflächen zu den Elektroden, als auch an der Grenzfläche zwischen den beiden PIN-Dioden innerhalb der Tandemzel-

le. Darüber hinaus können dotierte und damit leitfähige Schichten aus transparenten organischen Materialien insbesondere in Tandem-Solarzellen gewinnbringend als optische Spacer eingesetzt werden, um die Absorberschichten in die optischen Interferenzmaxima zu platzieren.

Auf diese Art konnte die Heliatek GmbH kürzlich Tandem Solarzellen mit Novalad Redox-Dotanten demonstrieren (Abbildung 5), die eine Spannung von 1,7 V im offenen Stromkreis, eine Effizienz von deutlich über 5% und eine lange Lebensdauer (Lichtdosierung von drei Jahren bei 50°C mit kaum einer Degradierung) erreichen [2].

Dotierte Schichten können aber auch für Bauelemente verwendet werden, die nicht aus Dioden bestehen, in denen aber die Injektion von Ladungsträgern von großer Wichtigkeit ist: beispielsweise in organischen Transistoren. Obwohl der Transistor hauptsächlich auf den Ladungstransport entlang der Grenzschicht zwischen Halbleiter und Dielektrikum baut, kann die Injektion der Ladungsträger von Source oder Drain in den organischen Halbleiter nicht vernachlässigt werden, wenn der der Injektion entsprechende Widerstand eine ähnliche Größenordnung wie der Widerstand des Kanals hat. Der Injektionswiderstand kann mithilfe von dotierten Injektionsschichten allerdings drastisch gesenkt werden, womit auch das Verhältnis des Stromes im An- und Aus-Zustand deutlich vergrößert werden kann [3].

Zusätzlich zur verbesserten Injektion kann für einen ambipolaren organischen Halbleiter mithilfe der dotierten Injektions-

schicht auch die Art der injizierten Ladungsträger bestimmt werden, wobei mit einer p-dotierten Schicht ein p-Kanal Transistor und mit einer n-dotierten Schicht ein n-Kanal Transistor entsteht. Für die heutigen logischen Schaltungen, die mehrheitlich aus komplementären Bauteilen bestehen (CMOS), ist das insofern von Bedeutung, als dass die ganze Schaltung mit einem einheitlichen Grundriss basierend auf demselben organischen Halbleiter aufgebaut werden kann, wobei die Art des Transistors (p- oder n-Kanal) durch eine räumliche Strukturierung der Injektionsschicht bestimmt wird.

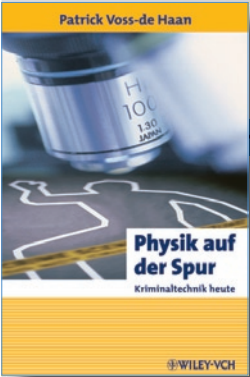
Marktaussichten

Wie anfangs erwähnt, sind OLED Displays schon heute in einem Teil der mobilen Displayanwendungen enthalten und es wird erwartet, dass der Marktanteil an OLED Displays (vor allem AMOLED Displays) in den nächsten Jahren noch deutlich zunimmt. Im Bereich der OLED Fernseher hat Sony schon für dieses Jahr ein neues größeres Gerät angekündigt. Die Konkurrenz schläft aber auch nicht und mindestens eine andere asiatische Firma im Elektronikbereich dürfte auch noch in 2009/10 ihren ersten OLED Fernseher auf dem Markt einführen. Der Eintritt der OLEDs in den Beleuchtungsmarkt wird von 2009 an schrittweise erfolgen. Zunächst werden sie in hochpreisigen Nischenanwendungen und Beschilderungen zum Einsatz kommen, ab 2011 werden sie Leuchtstoffröhren und Glühlampen in Büros und Wohnräumen verdrängen.

Was die organischen Solarzellen und Transistoren betrifft, so dürfte es da bis zur Kommerzialisierung noch ein bisschen länger dauern. Der Drang der Politik nach Nachhaltigkeit und die zuletzt erzielten Fortschritte in den organischen Solarzellen dürften allerdings auch in diesem Bereich schon in den nächsten paar Jahren zu ersten marktfähigen Produkten führen.

Referenzen

- [1] J. Birnstock *et al.*, SID 2008 Digest of Technical Papers, XXXIX, 822, 2008.
- [2] R. Franke *et al.*, Sol. Energy Mat. and Solar Cells, 92, 7, 2008.
- [3] T. W. Canzler *et al.*, Proceedings of SPIE, 7054, 70540O, 2008.



Patrick Voss-de Haan

Physik auf der Spur

Kriminaltechnik heute

Patrick Voss-de Haan, Mitarbeiter des BKA und seit vielen Jahren mit naturwissenschaftlichen Anwendungen in der Kriminaltechnik befasst, legt mit diesem Werk eine spannende und auch für Laien verständliche Einführung in die Techniken der Kriminalitätsprävention und -bekämpfung vor.


Im Zusammenspiel der verschiedensten Disziplinen – Physik, Chemie, Werkstofftechnik oder auch Psychologie – ist die Kriminaltechnik immer dann gefragt, wenn es um solide

Beweisketten geht. Wichtigstes Hilfsmittel ist das Rasterelektronen-Mikroskop (REM): War der Verdächtige am Tatort? War der Blinker zum Zeitpunkt des Unfalls eingeschaltet? Wurde das gefundene Projektil aus dem Lauf der sichergestellten Waffe abgefeuert?

Voss-de Haan geht in seinem Buch auf diese und zahlreiche andere Beispiele ein und zeigt, was Kriminaltechnik heute zu leisten imstande ist. Wer gerne knifflige Fälle löst, wird überrascht sein, welche Rolle die Physik dabei spielt.

2009. X, 306 Seiten,
58 Abbildungen. Broschur.
€ 14,90
ISBN: 978-3-527-40944-0

Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, E-Mail: service@wiley-vch.de, www.wiley-vch.de



Innum und Preisänderungen vorbehalten.