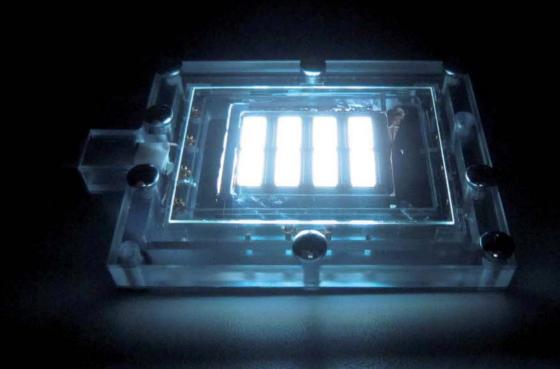
# Holger Spahr

# AC-OLEDs unter Verwendung passiver, oxidbasierter Dünnschichtelektronik - Die OLED an der Steckdose







 $\operatorname{AC-OLEDs}$  unter Verwendung passiver, oxidbasierter Dünnschichtelektronik - Die OLED an der Steckdose





## AC-OLEDs unter Verwendung passiver, oxidbasierter Dünnschichtelektronik -Die OLED an der Steckdose

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

## Dissertation

von Dipl.-Phys. Holger Spahr aus Bad Segeberg

Eingereicht am: 21. Oktober 2013 Mündliche Prüfung am: 17. Dezember 2013

Referenten: Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Kowalsky

Prof. Dr. rer. nat. habil. Andreas Waag

2014



#### Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2014

Zugl.: (TU) Braunschweig, Univ., Diss., 2014

978-3-95404-613-3

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2014

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0 Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage 2014

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

978-3-95404-613-3



# Inhaltsverzeichnis

Sy	Symbolverzeichnis			V	
Vo	orwor	t und I	Danksag	ung	X
Κı	urzfas	ssung			XII
Αl	ostrac	ct			X۷
Ei	nleitu	ing			1
1		_		and des Wissens	3
	1.1			ektronik	
		1.1.1		the Kontakte zwischen Leiter und Isolator	
		1.1.2		ther Strom in Isolatoren	
			1.1.2.1 1.1.2.2	Das Ohmsche Gesetz	
			1.1.2.2	Raumladungsbegrenzter Strom (SCLC)	
			1.1.2.3	Der Poole-Frenkel-Effekt im SCLC-Modell	
			1.1.2.4	Schottky-Barriere und thermionische Emission	
			1.1.2.6	Direktes Tunneln, Fowler-Nordheim-Tunneln und fallenunterstütz-	20
			1.1.2.0	tes Tunneln	23
		1.1.3	Dielektri	ischer Durchbruch	
		1.1.0	1.1.3.1	Intrinsischer Durchbruch: Modellannahmen und statistische Be-	20
			1.1.0.1	trachtungen	27
			1.1.3.2	Modell des filamentierten dielektrischen Durchbruchs	
		1.1.4	_	ische Eigenschaften dünner Oxide	
	1.2 Organische Elektrolumineszenz				
		1.2.1		cher Strom im organischen Schichtsystem	
		1.2.2		ission	
	1.3	Zusam		ung: Oxidbasierte Elektronik und organische Elektrolumineszenz	45
2	Proz			e und Bauteilcharakterisierung	47
	2.1	•		nnologien	
		2.1.1	Thermis	che Gasphasenabscheidung	48



### **INHALTSVERZEICHNIS**

		2.1.2		nzerstäubung	
		2.1.3	_	enabscheidung	
	2.2			ion	
	2.3			rakterisierung	
		2.3.1	•	zspektroskopie	
		2.3.2		enaufnahme	
		2.3.3		keitsbestimmung mit der Vierpunktmethode	
	2.4			zur Schichtdickenkontrolle	
		2.4.1		etrie	
		2.4.2		henprofilometrie	
	2.5	Zusam	mentassu	ng: Prozesstechnologie und Bauteilcharakterisierung	64
3				und kapazitive Anwendungen	65
	3.1			I und Zink-Zinnoxid als resistive Dünnschichten	
	3.2			innschichtkondensatoren	
		3.2.1		sche Eigenschaften von Dünnschichtkondensatoren auf Basis ALI	
			•	erter Oxiddielektrika	
		3.2.2		nung der maximalen Energiedichte von ALD-prozessierten Dün	
				ondensatoren auf Oxidbasis	
		3.2.3		uchverhalten von ALD-prozessiertem Aluminiumoxid	
	3.3			om durch Oxide	
		3.3.1		lungsbegrenzter Strom (SCLC) als limitierender Leitungsmech	
				n dünnen Schichten	
		3.3.2		mechanismen bei nicht-ohmscher Ladungsinjektion	
			3.3.2.1	Schottky-Barriere und thermionische Emission	
			3.3.2.2	Fowler-Nordheim-Tunneln als limitierender Leitungsmechanismu	
				im Hochfeldbereich	
			3.3.2.3	Der Poole-Frenkel-Effekt als stromlimitierender Leitungsmechanis	
			3.3.2.4	Konkurrierende Leitungsmechanismen bei sehr dünnen Aluminiur	
		_	•	oxid-Dielektrika	
	3.4	Zusam	mentassu	ng: Oxide für resistive und kapazitive Anwendungen	107
4	OLE			und Kondensator - die AC-OLED	109
	4.1			ittierende OLED	
	4.2	-		g von Widerstand und Kondensator	
	4.3	Simula	ition zur l	Dimensionierung eines AC-OLED-Moduls	120
5	Zusa	ammen	fassung	und Ausblick	129
Lit	teratı	ırverze	ichnis		135
Вє	etreut	e Arbe	eiten Stu	ıdierender	149
lm	Rah	men di	eser Arb	peit entstandene Veröffentlichungen	151



# Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung
AHI	Anode Hole Injection (Anodenseitige Lochinjektion)
ALD	Atomic Layer Deposition
EM	Emittermaterial
EQE	External Quantum Efficiency
ET	Elektrontransporter
HOMO	Highest Occupied Molecular Orbital
$\operatorname{HT} \ \dots \dots \dots$	Lochtransporter
IIR-Modell	Impakt-Ionisations-Rekombinations-Modell
ITO	Indium Tin Oxide
LUMO	Lowest Unoccupied Molecular Orbital
MM	Matrixmaterial
MSTAT	Multi Step Trap Assisted Tunneling
NLAT	Nanolaminat Aluminiumoxid Titandioxid
NLAZ	Nanolaminat Aluminiumoxid Zirkoniumdioxid
OMBD	Organic Molecular Beam Deposition
PLZT	$Pb_{0,92}La_{0,08}Zr_{0,95}Ti_{0,05}O_3$
SCLC	Space Charge Limited Current
SILC	Stress Induced Leakage Current
TAT	Trap Assisted Tunneling
TCO	Transparent Conductive Oxide
TDMATi	Tetrakisdimethylamino-Titan
TDMAZr	Tetrakisdimethylamino-Zirkonium
TFL	Trap Filled Limit
TMA	Trimethylaluminium
TTA	Triplett-Triplett-Annihilation
VRS	Voltage Ramp Stress
ZTO	Zinc Tin Oxide
$TiO_2 \dots \dots$	Titandioxid
$TiO_{2-x}$	nicht-stöchiometrisches Titandioxid
A	Fläche (eines Plattenkondensators)
$A^*$	angeregter Akzeptorzustand
$A^0$	Akzeptorgrundzustand



## **SYMBOLVERZEICHNIS**

$a_0 \dots \dots $	
	Leuchtfläche eines OLED-Pixels
α	
-	charakteristische Lebensdauer
	Elektronenvervielfachungskoeffizient
	Polarisierbarkeit einer Einzelschicht
$\frac{A}{\lambda}$	effektive Richardson-Konstante
	Vektorflächenelement
	Vorfaktor beim Poole-Frenkel-Effekt
	Vorfaktor nach Poole
$\beta_{\mathrm{W}}$	
C	
$C_{\mathrm{start}}$	Kapazität des Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Dünnschichtkondensators vor Inbetriebnahme
	des AC-OLED-Moduls
$C_{\text{final}}$	Kapazität des Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Dünnschichtkondensators nach Inbetriebnahme
7	des AC-OLED-Moduls
d	Schichtdicke
	angeregter Donatorzustand
$D^{\circ}$	Donatorgrundzustand
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Schichtdicke des AC-OLED-Demonstrators
	Schichtdickeparameter
	Segmentlänge; Mittelwert der Zellhöhe aller Einzeldefekte
	Elemente der OLED-Reihenschaltung
$d = z_2 - z_1 \dots \dots$	
	Tunnelwahrscheinlichkeit bzw. Durchlässigkeit
	ZTO-Schichtdicke des AC-OLED-Demonstrators
	elektrische Feldstärke
<i>e</i>	
	Durchschlagfestigkeit
	Energie des Leitungsbandes
	Bandabstand bezogen auf Silizium
$E_{\rm F}$	
	Quasi-Fermi-Niveau im nicht-thermischen Gleichgewicht
	Parameter im Durchbruchmodell
$E_i$	zum Zustand $i$ gehörige Energie
	dimensionslos normiertes, lokales elektrisches Feld
	lokale elektrische Feldstärke
	konstanter Feldstärkeverlauf im Schottky-Modell
	elektrisches Feld der sphärischen Polarisationsladungen
	Dielektrizitätskonstante
$\epsilon$	
	relative Permittivität
	relative Permittivität Aluminiumoxid
$\epsilon_{rSiO_2}$	relative Permittivität Siliziumdioxid



	relative Permittivität Titandioxid
	relative Permittivität Zirkoniumdioxid
	Energieniveau der Haftstelle
	Energie des Valenzbandes
$E_{\text{Vak}}$	Vakuumenergieniveau
	elektrischer Feldstärkevektor
	kumulative Fehlerwahrscheinlichkeit
f	Frequenz
$f_{\rm bd}$	Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Perkolationspfad am Durch-
	bruch teilnimmt
	Fehlerverteilung einer Defektzelle
$F_i = \frac{A}{A+B} \dots$	Flickerindex
	Anteil an fehlerhaften Proben
$F_{PF}$	Fallenterm im SCLC-Modell mit Poole-Frenkel-Erweiterung
$F_{\text{PFmodern}}$	Fallenterm im SCLC-Modell mit Poole-Frenkel-Erweiterung und Berück-
	sichtigung der Fermi-Dirac-Verteilung
G	elektrischer Leitwert
$h\nu$	Photonenergie
	Plancksches Wirkungsquantum
•	reduziertes Plancksches Wirkungsquantum
<i>I</i>	
	durch den Parallelwiderstand $R_p$ fließender Strom
	durch den Serienwiderstand $R_s$ fließender Strom
	Emissionsspektrum
i	
	Gesamtstrom durch Parallelwiderstand
-	Gesamtstrom durch Serienwiderstand
	durch den Parallelwiderstand R <sub>p</sub> fließender Strom
	durch den Serienwiderstand R <sub>s</sub> fließender Strom
<i>j</i>	
	Stromdichte direktes Tunneln
	Fowler-Nordheim-Tunnelstromdichte
$j_{\text{S}}$	Stromdichte bei Schottky- bzw. thermionischer Emission
	Stromdichtevektor Tunnelle efficient 1
_	Tunnelkoeffizient 1 Tunnelkoeffizient 2
	Tunnelkoeffizient 3
	Boltzmann-Konstante
	Imaginärteil des komplexen Brechungsindex
L	
$\lambda$	
$\lambda_{\mathrm{F}}$	~
	mittlere freie Weglänge
	van der Waals-Radius
	Steigung im linearen Fit
,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	Societies in miceron in



### **SYMBOLVERZEICHNIS**

$m_{\rm e}$	Elektronenmasse
	effektive Masse des Elektrons im Leiter
	effektive Masse des Elektrons im Dielektrikum
	effektive Masse der Elektronen
	effektive Masse der Löcher
	effektive Masse der Ladungsträgerspezies i
$M_{\mathrm{m}}$	
	effektive Masse im Oxid
$\mu$	<u> </u>
	chemisches Potential
$n \dots \dots \dots$	
,	Flächenskalenfaktor
$n_{\rm ALD}$	
$N_{\text{def}}$	
	kritische Defektdichte
	Zustandsdichte im Leitungsband
	Dichte der Ladungen im Leitungsband
	Länge einer Defektzelle
$n_{\text{dip}}$	<del>-</del>
	Anzahl Elektronen
-	Zahl der Teilchen im Zustand $i$
$n_{\rm ITO}(p_{\rm e})$	Ladungsträgerdichte ITO in Abhängigkeit von $p_{\rm e}$
* /	komplexer Brechungsindex
	Realteil des komplexen Brechungsindex
$N_{\rm ges}$	Gesamtzahl der Teilchen
$N_{\rm t}$	Zustandsdichte der Haftstellen
$n_{\rm t}$	Dichte der in Haftstellen fixierten Ladungen
n(x)	Dichte der Elektronen
$n_{\rm ZTO}(p_{\rm e})$	Ladungsträgerdichte ZTO in Abhängigkeit von $p_{\rm e}$
$\omega$	Kreisfrequenz
<i>p</i>	Druck
,	Leistungsdichte Sputtern
	Anteil spiegelnd gestreuter Elektronen
	Generierungswahrscheinlichkeit der Defektdichte pro injiziertem Elektron
$P_{\text{ges}}$	vom Gesamtdevice aufgenommene elektrische Leistung
$\Phi$	Aktivierungspotential
$\phi$	Phasenwinkel der Impedanz
$\Phi_0$	reduzierte Höhe der Schottky-Barriere
$\Delta\Phi_{\rm B}$	Schottky-Barriereverringerung
$\Phi_{FN}$	Fowler-Nordheim-Energiebarriere
	reduzierte Fowler-Nordheim-Barriere
	elektrischer Wirkungsgrad
	photometrischer Wirkungsgrad
	Höhe des Kastenpotentials beim Schottky-Kontakt
	Tiefe einer Haftstelle
υ	



T ( )	
	elektrostatisches Potential (x-Richtung)
$\vec{P}$	
$P_{\text{OLED}}$	von der OLED-Reihenschaltung aufgenommene, elektrische Leistung
p(x)	Dichte der Löcher
$p_x$	Impulsanteil x im Phasenraum
$p_y$	Impulsanteil y im Phasenraum
$p_z$	Impulsanteil z im Phasenraum
$\overline{Q}$	Ladung
Q	momentane Ladung des Kondensators
-	Ladung des Kondensators nach Zeitschritt $\Delta t$
_	Ladung beim Durchbruch
•	elektrischer Widerstand
	Radiusvariable Vierpunktmethode
	Radius um ein angeregtes Molekül
	Nukleationskeimgröße; Fitparameter im Durchbruchmodell
	Ersatzserienwiderstand
-	Donator-Akzeptor-Molekülabstand
$R_F$	<del>-</del>
$\rho_{\infty}$	spezifischer Bulkwiderstand bei Raumtemperatur
$\rho_{\mathrm{ITO}}$	spezifischer Widerstand ITO
$\rho_{\rm c}$	Ladungsdichte im Leitungsband des Dielektrikums
$\rho_{\mathrm{m}}$	
$\rho  \mathrm{d}\rho  \mathrm{d}\phi  \dots \dots$	
•	Raumladungsdichte
$\rho_{\rm t}$	Ladungsdichte in Fallenzuständen
	vom Messgerät angezeigter Widerstand
	Parallelwiderstand
$R_s$	Serienwiderstand
1	senkrecht bzw. parallel zur Einfallsebene polarisiertes Licht
	elektrischer Widerstand des ZTO-Vorwiderstandes vor Inbetriebnahme
	des AC-OLED-Moduls
$R_{\text{final}}$	
	nahme des AC-OLED-Moduls
$R_U$	Ersatzserienwiderstand
s	Nadelabstand Vierpunktmethode
	Defektquerschnitt
$\sigma_{\mathrm{F}}$	Filamentquerschnitt
$\sigma_{\mathrm{Frenkel}}$	
$\sigma_{\mathrm{ITO}}$	
$\sigma$	
$\sigma_{\text{Poole}}$	
$\sigma_t$	
	Wirkungsquerschnitt
<i>t</i>	Zeitparameter



## **SYMBOLVERZEICHNIS**

	absolute Temperatur
	ellipsometrische Parameter
	charakteristische Lebensdauer
	charakteristische Vibrationszeit
	mittlere Exzitonenlebensdauer
	Time To Breakdown
	Fallenterm im SCLC-Modell (Boltzmann-Verteilung)
	Fallenterm im SCLC-Modell (Fermi-Dirac-Verteilung)
$T_{\rm R}$	-
	elektrische Spannung
$U_{AC}$	
- ' '	zeitabhängige Quellspannung (Netzspannung)
	Durchbruchspannung
^ -	Spannung am Kondensator
	Spannungsamplitude
$U_{\rm ext}$	-
	Spannungsabfall Vierpunktmethode
	potentielle Energie beim Fowler-Nordheim-Dreieckpotential
	Geschwindigkeit der Elektronen in Feldrichtung
	Fitparameter im Durchbruchmodell
,	Flächenenergiedichte
$W_{\rm A}$	
_ ~	Bandlücke Aluminiumoxid
	Verringerung der Energiebarriere beim Poole-Frenkel-Effekt
$W_{\text{Gap}}$	
	Bandlücke eines Halbleiters / Isolators
	Austrittsarbeit ITO
	Bandlücke eines Metalls
$W_N$	
	Wall Plug Efficiency (elektrische Effizienz des Gesamtbauteils)
	Bandlücke Siliziumdioxid
,	Volumenenergiedichte
$W_z$	Energie der Elektronen in Feldrichtung
x	v e
y	y-Koordinate im kart. Koordinatensystem bzw. beliebige Variable
$y_0 \ldots \ldots$	y-Achsenabschnitt im linearen Fit
z	z-Koordinate im kartesischen Koordinatensystem
$Z(\omega)$	Impedanzspektrum



## Vorwort und Danksagung

IE vorliegende Arbeit entstand während meiner vierjährigen Beschäftigung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Braunschweig. Die in dieser Arbeit gezeigten Ergebnisse sind zum Teil in den von mir bearbeiteten Projekten TOPAS 2012 und KOBALT 2015 entstanden. Bei beiden handelt es sich um vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Kooperationsprojekte, wobei das Institut für Hochfrequenztechnik als Unterauftragnehmer der Philips GmbH in Aachen aufgetreten ist. Das Institut für Hochfrequenztechnik unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kowalsky beherbergt mittlerweile einen reichhaltigen Wissensfundus zum Thema organische Elektronik aber auch Dünnschichttechnologie im Allgemeinen und Oxidtechnologie im Speziellen. Mein erster Dank soll daher an dieser Stelle an Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kowalsky gehen, der mir die Möglichkeit zur Promotion in diesem vielseitigen und anspruchsvollen Themenkomplex ermöglicht hat. Weiterhin möchte ich sehr herzlich meinem aktuellen Arbeitsgruppenleiter Dr. Hans-Hermann Johannes danken. Hans-Hermann hat als stets motivierender und einfallsreicher Vorgesetzter maßgeblich zu dem Gelingen dieser Arbeit aber vielmehr noch der von mir betreuten Projekte und verfassten Publikationen beigetragen. Nicht unerwähnt bleiben soll auch mein vorheriger Arbeitsgruppenleiter Dr.-Ing. Sami Hamwi, dem ich wegen seiner vielen Ideen und zahllosen Denkanstöße zu Dank verpflichtet bin.

Im folgenden werde ich bei ehemaligen und aktuellen Kollegen auf die Erwähnung der akademischen Grade verzichten - man möge es mir nachsehen. In der Riege der ehemaligen Kollegen am IHF gilt mein allergrößter Dank Hassan Gargouri. Hassan hat mich zu Beginn meiner Zeit am IHF mit viel Motivation, Fachwissen und Geduld mit der organischen Elektronik, der OMBD sowie jedem am IHF eingesetzten Messinstrument vertraut gemacht. Zwei sehr gute Kollegen hatte und sehr gute Freunde habe ich immer noch mit Thomas Winkler und Markus Tilgner. Mit ihnen wurde es bei fachlichen und fachfremden Gesprächen nie langweilig - unvergessen bleiben die tiefgreifenden Gespräche zum Mittagessen. Besonders und mit tiefer Verbeugung zu danken habe ich Johannes Reinker, der nach Hassans Wechsel in die Industrie dessen Sitzplatz geerbt und wie Hassan vor ihm die Position der guten Seele in Büro 1 übernommen hat. Johannes ist ein wahrer Tausendsassa und viele Ideen, die auch in dieser Arbeit ihren Platz gefunden haben, wären



ohne die Diskussionen mit ihm nie entstanden. Ein großer Dank gilt ihm insbesondere für die Unterstützung bei der Herstellung der AC-OLED-Demonstratormodule, wodurch mir das ein oder andere graue Haar erspart geblieben ist. Zu großem Dank verpflichtet bin ich allen (ehemaligen) Studenten, die mich dadurch geehrt haben, sie bei ihren Abschlussarbeiten betreuen zu dürfen. Besonders hervorheben möchte ich Felix Hirschberg, Christine Nowak und Markus Jakob, die sich ungeachtet ihrer hohen fachlichen Kompetenz als zwar kurzzeitige, dafür aber sehr gute Kollegen herausgestellt haben. Allen weiteren studentischen Abschlussarbeitern und studentischen Hilfskräften danke ich für ihren Einsatz, der nicht zuletzt einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit hatte.

Für zahlreiche wissenschaftliche Gespräche und erhellende Kaffeemomente danke ich allen aktuellen und ehemaligen Kollegen aus dem Chemikerbüro. Besonders hervorheben möchte ich Björn Wiegmann, Matthias Böttger und Fabian Albrecht für ihre Bereitschaft, sich aus wissenschaftlicher Neugier heraus auch meiner Themen anzunehmen und vertieft zu diskutieren. Auf die Frage, wie viele Proben, Messungen und Demonstratoren es ohne Justyna Rodziewicz und Kathleen Möhring gegeben hätte, gibt es eine klare Antwortkeine Einzige. Ihnen ist der stets zuverlässige Nachschub an Substraten sowie der von ihnen im Hintergrund garantierte, reibungslose Betrieb im LEO zu verdanken. Vielen Dank dafür. Für die zuverlässig hochqualitative Arbeit der feinmechanischen Werkstatt gilt stellvertretend für alle Werkstattmitarbeiter ein großer Dank an Olaf Flechtner.

Um nicht allen weiteren Mitarbeitern am IHF einzeln einen Absatz zu widmen, möchte ich mich nun bei allen weiteren aktuellen und ehemaligen Kollegen und Weggefährten, die nicht explizit aufgeführt sind, auf einmal bedanken: Vielen Dank! Weiterhin danke ich allen Korrekturlesern dieser Arbeit, und allen anderen, die in irgendeiner Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern danke ich für ihr fortwährendes Interesse an meiner Arbeit und ihre außerwissenschaftliche Unterstützung. Zum Abschluss gilt der allerhöchste Dank meiner Freundin Katrin, die während meiner Promotionszeit immer für mich da war und mich stets von Neuem unterstützt und motiviert hat.

Holger Spahr, im Dezember 2013



# Kurzfassung

N dieser Arbeit werden materialwissenschaftliche Fragestellungen und technologische Herangehensweisen zur Verwendung von organischen Leuchtdioden (OLEDs) bei  $230\,\mathrm{V}$ Netzwechselspannung behandelt. OLEDs sind auf organischen Halbleitermaterialien basierende, lichtemittierende Bauteile. Sie benötigen je nach Aufbau eine Betriebsspannung zwischen 3V und 12V zur hinreichenden Lichtabgabe. Damit die gesamte Netzspannungsamplitude zur Vermeidung von Effizienzeinbußen ausgenutzt werden kann, ist eine Reihenschaltung der OLED-Pixel erforderlich. Durch den Verzicht auf schaltelektronische Komponenten und die Wahl passiver, dünnschichtbasierter Widerstände und Kondensatoren kann die für OLEDs charakteristische, flache Bauform beibehalten werden. Dünnschichtwiderstände werden durch die Sputterdeposition der transparenten, leitfähigen Oxide Indium-Zinnoxid (ITO, Indium Tin Oxide) und Zink-Zinnoxid (ZTO, Zinc Tin Oxide) hergestellt. Zur Anwendung von ITO und ZTO als Dünnschichtwiderstand wird die Abhängigkeit ihres spezifischen Widerstandes von der Schichtdicke gemessen und anhand des Fuchs-Sondheimer-Gesetzes erläutert. Es zeigt sich, dass sich ITO und ZTO analog zu dünnen Metallschichten verhalten und ihr spezifischer Widerstand eine deutliche Abhängigkeit von der Schichtdicke aufweist. Darüber hinaus werden die ALD-prozessierbaren Oxide Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> und TiO<sub>2</sub> als Dielektrika für Dünnschichtkondensatoren hergestellt. Die resultierenden Dielektrika basieren sowohl auf reinem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> als auch auf gestapelten Subschichten, sogenannten Nanolaminaten, aus Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und ZrO<sub>2</sub> beziehungsweise Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und TiO<sub>2</sub>. Die Dielektrika werden elektrisch hinsichtlich ihrer relativen Permittivität durch Impedanzspektroskopie sowie der in ihnen dominierenden Leckstrommechanismen durch ansteigende Spannungsbelastung untersucht. Wird die Spannung bis zur Zerstörung des Dielektrikums erhöht, so findet der dielektrische Durchbruch statt. Am Beispiel von reinem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> wird die Schichtdickenabhängigkeit der Durchbruchfeldstärke oder Durchschlagfestigkeit mit Hilfe literaturbekannter Modelle erklärt. Sowohl aus der Identifizierung der Leckstrommechanismen als auch aus der Modellierung des Durchbruchverhaltens können Materialparameter, wie beispielsweise die relative Permittivität, extrahiert werden. Diese dienen zum einen der Verifizierung der vorherrschenden Leckstrommechanismen und zum anderen der Extraktion von Materialeigenschaften. Der letzte Abschnitt dieser Arbeit beschreibt die Integration von OLED-Reihenschaltung, ZTO-Vorwiderstand und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-



Dünnschichtkondensator. Es wird ein kaltweiß emittierendes AC-OLED-Modul vorgestellt, dessen Flickerindex durch Verwendung eines Dünnschichtkondensators signifikant verringert werden konnte. Am Beispiel eines rot emittierenden AC-OLED-Moduls wurde unter Verwendung eines Dimensionierungsalgorithmus eine weitere Verbesserung des Flickerindex erreicht.



## **Abstract**

HIS work deals with topics from material science and technological approaches regarding the usage of organic light emitting diodes (OLEDs) at mains voltage of 230 V. OLEDs are light emitting devices, based upon organic, semiconducting materials. Depending on their structure, OLEDs need a voltage of 3V to 12V for a sufficient amount of emitted light. To use the entire amplitude of the mains voltage and avoid efficiency loss, a serial connection of the OLED-pixels is necessary. By waiving switching electronic components and the choice of passive, thin film based resistors and capacitors, the typical flat design of OLEDs can be preserved. Thin film resistors are deposited by sputtering of transparent conductive oxides such as Indium Tin Oxide (ITO) and Zinc Tin Oxide (ZTO). In order to use ITO and ZTO as thin film resistors, their specific resistance depending on the layer thickness is measured and explained by the Fuchs-Sondheimer-Law. It is shown that ITO and ZTO behave analogous to thin metal layers and their specific resistance exhibits a significant dependence on the layer thickness. Furthermore the ALD-producible oxides Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> und TiO<sub>2</sub> are used as dielectrics in thin film capacitors. The resulting dielectrics are both based on pure  $Al_2O_3$  as well as stacked sublayers, called nanolaminates, consisting of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> or Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub>, respectively. The dielectrics are electrically examined regarding their relative permittivity and their dominating leakage current mechanisms. The dielectric breakdown occurs by increasing the voltage until the destruction of the dielectric occurs. Using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as an example, the thickness dependency of the breakdown electric field or disruptive strength is explained by applying a model known from literature. The identification of leakage current mechanisms as well as modeling of the breakdown behavior allows for obtaining material parameters. These parameters serve on the one hand for the verification of the actual leakage current mechanisms and on the other hand for extraction of material properties. The last section of this work describes the integration of the OLED serial connection, the ZTO current-limiting resistor and the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-thin film capacitor. A cold white emitting AC-OLED-module is presented which has a significantly reduced flickering index by usage of a thin film capacitor. Taking a red emitting AC-OLED-module as an example, a further reduction of the flickering index is reached by usage of an algorithm for dimensioning.