

1. Einleitung

Seitdem Tang und VanSlyke 1987 die Elektrolumineszenz von organischen Dünnschichten demonstriert haben [1, 2], ist das Forschungsinteresse hinsichtlich organischen Leuchtdioden (OLEDs, engl. **O**rganic **L**ight **E**mitting **D**iodes) besonders in den letzten Jahren in einem erheblichen Maße gestiegen, weil ihnen für Anzeigeelemente (engl. Low Contents Displays) und RGB-Flachbildschirme ein großes Marktpotenzial eingeräumt wird [3]. Nach intensiven Forschungsarbeiten sind organische Displays momentan schon in Serienreife auf dem Markt.

Der Aufbau von OLEDs besteht aus mehrschichtigen organischen Dünnschichten, wobei eine Deposition der verwendeten Substanzen auf nahezu jedem beliebigen Substrat ohne Zwang zur Gitteranpassung möglich ist. Dadurch erhält man eine einfache technologische Verarbeitung und somit eine kostengünstigere Realisierung von Anzeigeelementen in beliebigen Formen und Farben.

Die organischen Leuchtdioden lassen sich auf Grund von unterschiedlichen Substanzklassen und der damit resultierenden abweichenden Herstellungstechnologien in zwei Gruppen aufteilen: Die OLEDs sind zum einen aus Polymere aufgebaut, die mit Hilfe eines Lösungsmittels auf das Substrat aufgeschleudert (engl. spin coating) werden, und zum anderen bestehen sie aus Schichtenfolgen kleiner funktionaler Moleküle, die wegen ihrer kleinen Molekularmasse ohne Dissoziation aus beheizten Tiegeln im Ultrahochvakuum aufgedampft werden können. Letzt genannte Substanzklasse ermöglicht ein Aufeinanderbringen von beliebig vielen Dünnschichten unterschiedlicher Funktionalität, während die Polymere wegen ihrer Lösungsmittel auf zwei oder u. U. auch auf drei Schichten begrenzt sind. Durch die Auswahl bestimmter Emissionsfarbstoffe kann das gesamte sichtbare Spektrum abgedeckt werden. Dies ist eine Voraussetzung, um eine RGB-Darstellung durch ein organisches Display zu erreichen.

Das nächste Forschungsziel für organische Lumineszenz-Bauelemente mit der OLED als Ausgangspunkt ist die Entwicklung von elektrisch angesteuerten organischen Halbleiterlasern (OSL, engl. **O**rganic **S**emiconductor **L**aser). Damit werden die Vorteile der organischen Leuchtdioden, wie z. B. Substratfreiheit, die Vielzahl der Emissionsmaterialien für den gesamten sichtbaren Spektralbereich und die kostengünstige Realisierung, möglich. Jedoch ist bis heute kein Nachweis von elektrisch gepumpter Lasertätigkeit in amorphen OLED-Dünnschichten gelungen.

Seit der Demonstration des ersten blitzlichtgepumpten Rubinlasers ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) 1960 hat sich die Lasertechnologie in vielfältiger Weise ausgebildet. So werden verschiedene Laserarten verwendet und weiterentwickelt, wie z. B. der Festkörperlaser, der Gaslaser, der Halbleiterlaser und der Farbstofflaser. Heutzutage finden insbesondere kompakte Halbleiterlaser ihre Anwendung in den Bereichen der Kommunikationstechnik, der optischen Datenspeicherung, der Unterhaltungselektronik und der Medizintechnik.

Dabei ist der DFB-Laser (DFB, engl. **D**istributed **F**eedback) mit seiner periodischen Strukturierung hervorzuheben. Der erste DFB-Laser wurde 1971 als Farbstofflaser (Shank et al. [4]) aufgebaut, und der erste DFB-Halbleiterlaser wurde 1973 von Nakamura et al. realisiert [5]. Die Vorteile der DFB-Laser liegen in der Schwellenreduzierung und im Monomodenbetrieb mit hoher Nebenmodenunterdrückung, der auch bei Hochfrequenzmodulation gewährleistet ist [6–8].

Wie eingangs beschrieben, steht ein Nachweis für eine elektrisch gepumpte Lasertätigkeit in amorphen, ungeordneten Dünnschichten aus Polymeren bzw. aus kleinen funktionalen Molekülen aus. Im Jahre 2000 sorgte hingegen ein elektrisch gepumpter Laser aus Tetracen-Kristallen (Batlogg et al. [9]) für Aufsehen. Ein Tetracen-Kristall wurde dazu symmetrisch in zwei organische Feldeffekttransistoren (OFET, engl. **O**rganic **F**ield-**E**ffect **T**ransistor) eingebettet [10] und als Fabry-Pérot-Resonator, der durch die Kantenfläche definiert wurde, zur Lasertätigkeit gebracht. Damit wurde die Problematik der ausreichenden Ladungsträgerinjektion überwunden [11]. Der Tetracen-Kristall-Laser liefert einen weiteren Ansporn, um einen organischen Laser, elektrisch gepumpt, auch mit typischen OLED-Materialien zu erreichen.

Optisch gepumpte organische Laser werden zur Zeit in vielfältigen Formen und Strukturen untersucht [11–15]. Auf Grund der technologisch einfacheren Präparationsmöglichkeit werden insbesondere optisch gepumpte Polymer-Laserstrukturen [16–19] aufgebaut. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über die vielfältigen Strukturierungsformen für organische Laser: DFB-Laser [20–23], 2D-DFB-Laser [23–25], 'Microdisk'-Laser [26], Mikroresonator-Laser [19], 'Microring'-Laser [27], 'Circular Grating' DBR-Laser [28, 29] und 'Whispering-Gallery mode' Laser [13, 30]. Die Strukturierung der Substrate erfolgt zumeist durch holographische oder lithographische Prozesse. Eine Alternative bietet die holographische Strukturierung der organischen Schicht selbst [31, 32].

Nur einige der vorgestellten, optisch gepumpten Strukturen eignen sich für einen Übergang zu elektrisch angesteuerten Bauelementen. Dazu zählen die DFB-Laser mit verteilter Rückkopplung und die Mikroresonatoren, die sich hinsichtlich ihres Aufbaus an den vertikal emittierenden Diodenlasern (VCSELS, engl. **V**ertical **C**avity **S**urface **E**mitting **L**aser [33]) anlehnen.

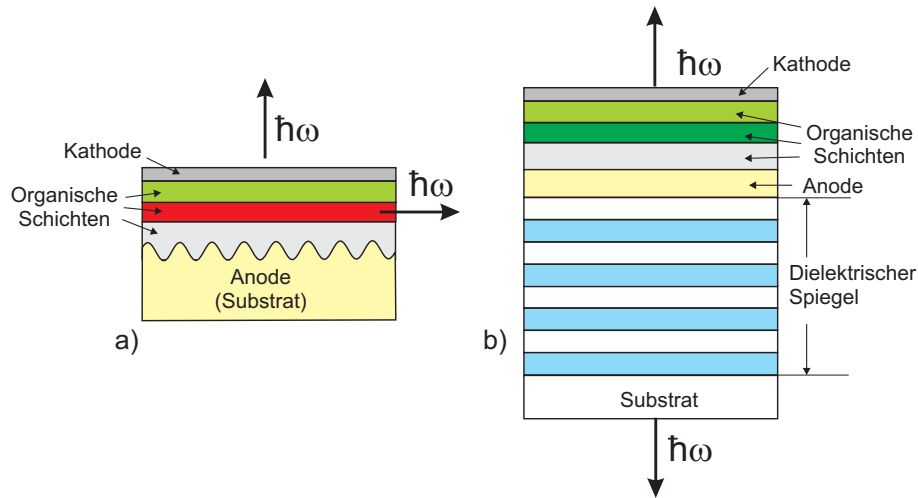


Bild 1.1.: a) DFB-Struktur und b) Mikroresonator in OLED-Geometrie.

In Bild 1.1 ist der prinzipielle Aufbau dieser Strukturen in Kombination mit der OLED-Geometrie skizziert. Die Emission erfolgt beim Mikroresonator orthogonal zur Schichtenfolge, während bei der DFB-Struktur sowohl orthogonal als auch lateral ausgekoppelt werden kann. Beide Strukturen werden im Rahmen dieser Arbeit untersucht und bewertet.

1.1. Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Untersuchung hinsichtlich einer Realisierung von elektrisch angesteuerten, organischen Laserdioden durchzuführen. Dabei stehen die Technologie zur Herstellung von emittierenden Bauelementen und deren messtechnische Charakterisierungen mit abschließender Bewertung im Vordergrund der Betrachtungen. Die Arbeit gliedert sich in drei Themenschwerpunkte: Fluoreszenz-Dynamik organischer Materialien, Elektrolumineszenz-Dynamik von strukturierten Bauelementen und optisch gepumpte organische DFB-Laserstrukturen.

In Kapitel 2 werden zunächst die physikalischen Grundlagen der Lumineszenzmechanismen organischer Materialien und der Aufbau von organischen Mikroresonator-Bauelementen dargestellt. Da die DFB-Laserstrukturen einen wesentlichen Themenschwerpunkt darstellen, werden die Grundlagen für die Lasertätigkeit in organischen Filmen und die Wellenleitung mit verteilter Rückkopplung aufgezeigt. Außerdem wird die grundsätzliche Funktionsweise von organischen Leuchtdioden dargestellt.

Kapitel 3 befasst sich mit der Auswahl der organischen Materialien und mit den Herstel-

lungsverfahren zur Realisierung organischer Bauelementen. Außerdem werden die Herstellung und die Charakterisierung von dielektrischen Spiegeln beschrieben. Weiterhin wird ein photolithographischer Prozess vorgestellt, mit dessen Hilfe die Strukturierung von OLEDs mit geometrischen Abmessungen im Mikrometerbereich erfolgt. Abschließend wird in diesem Kapitel die Herstellung von ITO-Schichten und von Bragg-Gittern für DFB-Laserstrukturen beschrieben.

Die Fluoreszenz-Dynamik organischer Dünnschichten wird in Kapitel 4 dargestellt. Zunächst wird dazu die optische Messtechnik zur Charakterisierung der organischen Emitter beschrieben. Durch zeitaufgelöste Photolumineszenzmessungen an den organischen Bauelementen werden die charakteristischen Raten der strahlenden Übergänge untersucht. Durch eine optische Charakterisierung wird die Realisierung eines Doppel-DBR-Mikroresonators bewertet. Weiterhin werden die organischen Materialien hinsichtlich verstärkter spontaner Emission untersucht.

Der Aufbau und die Elektrolumineszenz-Dynamik von strukturierten OLEDs werden in Kapitel 5 vorgestellt. Als organischer Emitter wird das Materialsystem Alq_3 :Phen-Qd verwendet, das sich als effiziente Emissionsschicht in OLEDs bewährt hat. Im Vordergrund steht bei gepulster elektrischer Ansteuerung der organischen Leuchtdioden das zeitliche Verhalten der Elektrolumineszenz.

Der Themenschwerpunkt der optisch gepumpten organischen DFB-Laserstrukturen wird in Kapitel 6 behandelt. Dabei werden zunächst die Anpassungen der Bragg-Gitter und der Aufbau der organischen DFB-Strukturen betrachtet, die einerseits auf strukturierten oxidierten Silizium-Wafern und andererseits auf strukturierten PET-Folien basieren. Weiterhin wird die optische Messtechnik zur Charakterisierung der Laser vorgestellt. Die rot emittierenden DFB-Laser werden hinsichtlich Emissionsspektrum, Polarisation, Schwelle, Dynamik und Temperaturabhängigkeit untersucht. Ein wesentlicher Teil des Kapitels besteht in der Untersuchung des Einflusses von Kontaktschichten auf den DFB-Laser. Dabei wird die Schichtenfolge der optisch gepumpten DFB-Laser auf die Anforderungen im Hinblick auf elektrisch gepumpte Bauelemente angepasst. Abschließend wird in diesem Kapitel ein blau emittierender DFB-Laser vorgestellt.

Kapitel 7 stellt die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit in einer Zusammenfassung zusammen.