

# Conformable Light Emitting Modules

Vervormbare lichtgevende modules

Michal Jablonski

Promotoren: prof. dr. ir. J. Vanfleteren, dr. ir. F. Bossuyt  
Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van  
Doctor in de Ingenieurswetenschappen: Elektrotechniek

Vakgroep Elektronica en Informatiesystemen  
Voorzitter: prof. dr. ir. R. Van de Walle  
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur  
Academiejaar 2014 - 2015



# Nederlandse samenvatting

Elektronica dat kan vervormd worden geniet reeds lange tijd interesse vanuit de medische sector. Vandaag de dag kan er echter ook een groeiende interesse waargenomen worden voor licht modules en verlichtingsgerelateerde toepassingen. Eenzelfde trend kan waargenomen worden in verscheidene, uiteenlopende sectoren, zoals de welzijnssector, de automobielsector of de sector van de draagbare elektronica. Het gebruik van vervormbare, rekbare systemen biedt uiteenlopende voordelen voor zowel consumenten als fabrikanten. Voor eerstgenoemde bieden toepassingen die nauw aansluiten op het lichaam extra comfort, terwijl voor laatstgenoemde het gebruik van vervormbare substraten meer ontwerpvrijheid en dus de mogelijkheid tot differentiatie biedt. Zoals in dit werk duidelijk zal worden, kunnen flexibele systemen lichter gemaakt worden, bieden ze meer tolerantie alsook de mogelijkheid tot heterogene integratie. Dankzij de 'Stretchable Molded Interconnect' (SMI) technologie, die besproken wordt in dit proefschrift, is het mogelijk zulke vervormbare, rekbare systemen te realiseren.

Alvorens de technologie-ontwikkeling te behandelen, wordt in Hoofdstuk 1 de achtergrond van vervormbare en rekbare elektronische systemen geschetst. Hierbij worden ook de nodige definities en termen geïntroduceerd.

In Hoofdstuk 2 worden dan weer de vereisten voor het combineren van vervormbare substraten en lichtemitterende componenten besproken. Er zullen kort enkele technologieën aangehaald worden die het mogelijk maken om rekbare lichtbronnen voor grote oppervlakken te realiseren.

Hoofdstuk 3 behandelt het SMI proces om elektronica in te bedden in een zacht, vervormbaar polydimethylsiloxaan (PDMS) elastomeer.

In Hoofdstuk 4 worden de mechanische (inclusief de elastische) eigenschappen van de SMI materialen geëvalueerd.

In Hoofdstuk 5 wordt de optimalisatie van de betrouwbaarheid van de verbindingen vervaardigd met behulp van deze materialen besproken. Een basiselement voor de rekbare verbindingen zijn de meanderstructuren, nodig om het geheel uit te kunnen rekken. De geometrie van deze meanders wordt geoptimaliseerd door middel van statistische modellering van zowel de vermoeïng van de verbindingen als van de levensduur van de elektronische componenten. De resultaten van deze modellering worden eveneens gebruikt om de ontwerpregels voor systeemintegratie te definiëren.

In Hoofdstuk 6 worden de optische eigenschappen van de verschillende

SMI materialen gebenchmarkt, alsook de eigenschappen die inherent zijn aan de fabricage technieken die gebruikt worden bij 'Liquid Injection Molding' (LIM).

Gebaseerd op bestaande ontwerpregels voor rigide printplaten (zogenoemd 'printed circuit boards') en flexibele printplaten (zogenoemd 'flexible circuit boards'), en rekening houdend met de materiaaleigenschappen, worden in Hoofdstuk 7 de ontwerpregels voor de SMI licht modules beschreven.

Tot slot komen in Hoofdstuk 8 verschillende demonstratoren van de SMI licht modules aan bod, gaande van het gebruik in lichttherapie, over medische toepassingen tot de binnenverlichting in auto's. Deze demonstratoren illustreren zowel de voordelen als de uitdagingen verbonden aan het gebruik van vervormbare elektronica. In wat volgt lichten we een tipje van de sluier op en halen we reeds enkele toepassingen en belangrijke observaties aan.

Lichttherapie - Sinds enkele jaren is er een stijging op te merken in het gebruik van blauw licht in lichttherapie. Het gebruik van blauw licht in de neonatologie voor de afbraak van bilirubine bij pasgeboren baby's is al langer gekend. Ondertussen weet men ook dat blauw licht kan gebruikt worden om de productie van melatonine te remmen, om wondgenezing te versnellen en om pijn te verzachten. Voor deze toepassingen, alsmede deze waar licht met andere golflengtes gebruikt wordt, zou de mogelijkheid om deze lichtbronnen in te bedden in vervormbare substraten een grote stap vooruit betekenen. Wanneer de lichtbron bv. als een armband kan gedragen worden, verhoogt dit niet alleen het comfort van de drager, maar ook de efficiëntie van de behandeling aangezien er minder licht verloren gaat. Deze argumenten zijn des te meer van tel aangezien voor vele van deze behandelingen een lange, continue belichting nodig is om het gewenste resultaat te bekomen. Een van de voorbeelden die besproken wordt, is de 'Repetitive Strain Injury' (RSI) demonstrator waarbij de SMI technologie gebruikt wordt voor het inbedden van een matrix van hoogvermogen LEDs in een zacht, flexibel en rekbaar polymeer. Door deze demonstrator vervolgens op textiel te lijmen, is het mogelijk een zachte, comfortabele polsband te realiseren (Fig.1(b)). Om de rekbaarheid van deze demonstrator te testen, werd deze onderworpen aan 10% rek. Na 120000 cycli daalde de efficiëntie slechts 1%. Echter, niet alleen de levensduur of betrouwbaarheid is belangrijk, maar ook de efficiëntie in het overbrengen van het licht. Dit laatste moet op de koop toe kunnen gebeuren zonder de huid te verbranden. Om de veiligheid op lange termijn te garanderen, moet de temperatuur onder de 42°C blijven. Hiertoe worden enerzijds efficiëntere LEDs gebruikt, en anderzijds worden PDMS materialen geselecteerd die transparant zijn voor blauw licht en tevens een hoge thermische geleidbaarheid hebben.

Auto verlichting - In de automobiel sector biedt de mogelijkheid tot vormen van lichtbronnen verscheidene voordelen. Voor dit soort toepassingen is het voldoende dat het systeem slechts eenmalig vervormbaar is. Hierdoor kan de verlichting mooi geïntegreerd worden in het interieur van de wagen (Fig.1(d)). Niet alleen de lichtbron zelf, maar ook de bijhorende elektronica moet in de binnenbekleding van de wagen verwerkt worden (Fig.1(g)). Hierbij

moet steeds voldaan worden aan de strikte temperatuurs- en vochtigheidseisen die opgelegd worden aan elektronische circuits in deze sector. Om aan te tonen dat aan de automobiel standaarden is voldaan (ISO 16750:2003), werden de systemen onderworpen aan temperatuurvariaties gaande van  $-40^{\circ}\text{C}$  tot  $65^{\circ}\text{C}$ , en dit in een atmosferische omgeving met een relatieve vochtigheid van 93%. Het voordeel van de SMI technologie is dat de verschillende componenten die reeds aan de automobiel standaarden voldoen, te verkrijgen zijn. Het PDMS elastomeer waarin de elektronica ingebed wordt, zorgt voor extra bescherming van de componenten. Bovendien is er geen luchtlaag tussen de LEDs en het PDMS elastomeer aanwezig, waardoor inkoppelverliezen gewijt aan Fresnel reflectie verwaarloosbaar zijn. Moderne LED lenzen worden vervaardigd uit PDMS zodat er slechts een minimaal verschil in brekingsindex is en de verliezen dus nog kleiner zijn. Dit heeft als bijkomend voordeel dat de alignering van de LED relatief ten opzichte van de lichtpijp minder strikt is. Een andere beperking eigen aan optische systemen betreft de blootstelling aan UV licht. Echter, waar veel lichtgeleidende polymeermaterialen, zoals aromatisch polyurethaan, geel uitslaan, doorstaat PDMS de testen met Xenon lampen probleemloos. Daartegenover staat dat PDMS een thermohardend materiaal is waardoor het, in vergelijking met thermoplastische materialen, minder evident is om het een goed gedefinieerde, finale vorm te geven.

OLED verlichting - Het gebrek aan een goede vochtbarrière heeft flexibele OLEDs lange tijd parten gespeeld. Alhoewel de betrouwbaarheid steeds beter wordt, waren er tijdens dit doctoraatsonderzoek onvoldoende betrouwbare flexibele OLEDs beschikbaar om deze uitvoerig te kunnen bestuderen. Wel kunnen we uit de twee besproken testcases besluiten dat flexibele OLEDs zeker een voordeel kunnen betekenen voor rekbare verlichting. De combinatie van de flexibele OLEDs met de flexibele, rekbare elektronica leidt tot lichte, onopvallende systemen (Fig.1(i)) die makkelijk in het interieur te integreren zijn. Terwijl een LED een felle puntbron is, is een OLED een grotevlakkenstraler. Dit betekent dat een diffuus materiaal rondom de LEDs moet aangebracht worden om mooi egaal licht in de ruimte te brengen, wat het lichtrendement doet dalen. Dit maakt OLEDs een geducht alternatief voor LED verlichting, hoewel deze laatste een hoger Lumen per Watt heeft. Bovendien bieden ze ontwerpvrijheid bij het bepalen van de vorm van het actieve gebied van OLEDs en hebben ze tevens een ongeziene optische uniformiteit. Bijkomende optische modellering of verlies in lichtvermogen, zoals het geval is bij kwaliteitsLEDs, zijn hier niet van toepassing.

Desalnietemin moeten er afwegingen gemaakt worden en kunnen er heuse limitaties vastgesteld worden in het gebruik van OLEDs voor sommige toepassingen (bv. de 'Renal Monitor' die in Hoofdstuk 8 besproken wordt). We kunnen dus besluiten dat LEDs en OLEDs geen rechtstreekse concurrenten zijn, maar elk hun specifiek toepassingsgebied hebben.



## English summary

While highly conformal electronics have always been of interest in case of medical applications, in the recent years also many light and lighting related applications are emerging which demand conformability. Well-being, automotive or wearable electronic applications are just a few examples where these trends can be observed. We are finding that conformability could bring various benefits to both end users (comfort through biomimetics and haptics) as well as manufacturers (heterogeneous integration, light weight, more design freedom, differentiation and less stringent tolerancing). Application of SMI (Stretchable Molded Interconnect) technology, that attempts to address these demands, will be discussed in this work.

Before the technology can be introduced, background information and definitions of conformable and stretchable circuits are introduced in Chapter 1, followed by Chapter 2 on requirements due to the combination of conformability and light emitting nature of devices. The same chapter shortly discusses different technologies capable of realizing large area, conformable light sources.

Chapter 3 introduces the SMI technology process that encapsulates electronics into a soft and conformable PDMS elastomer.

In Chapters 4 and 5 the tensile, mechanical properties of the SMI materials and the stretchable interconnect are evaluated. The interconnect fatigue, electrical life is statistically modeled in order to optimize the meander geometry for improved reliability and in order to support system integration design rules.

Chapter 6 is a benchmark of the SMI materials optical properties as well as those properties resulting from LIM fabrication.

Taking into account the material properties, some existing PCB, FCB or derived rules, the SMI light modules design rules are laid out in Chapter 7.

At the end of this work (Chapter 8) some example realizations of SMI light modules will be demonstrated, covering the field of well being (light therapy), medical application and automotive interior lighting. Characterization of the units will be used to demonstrate the benefits and challenges resulting from use of conformable electronics. Some applications and key observations are shortly introduced below.

Blue light therapy devices: Since a few years the interest in realization of blue light therapy devices has been on an incline. Starting from long deployed neonatal jaundice treatment, through more recently discovered melatonin suppression effect, wound healing acceleration and disinfection or currently re-

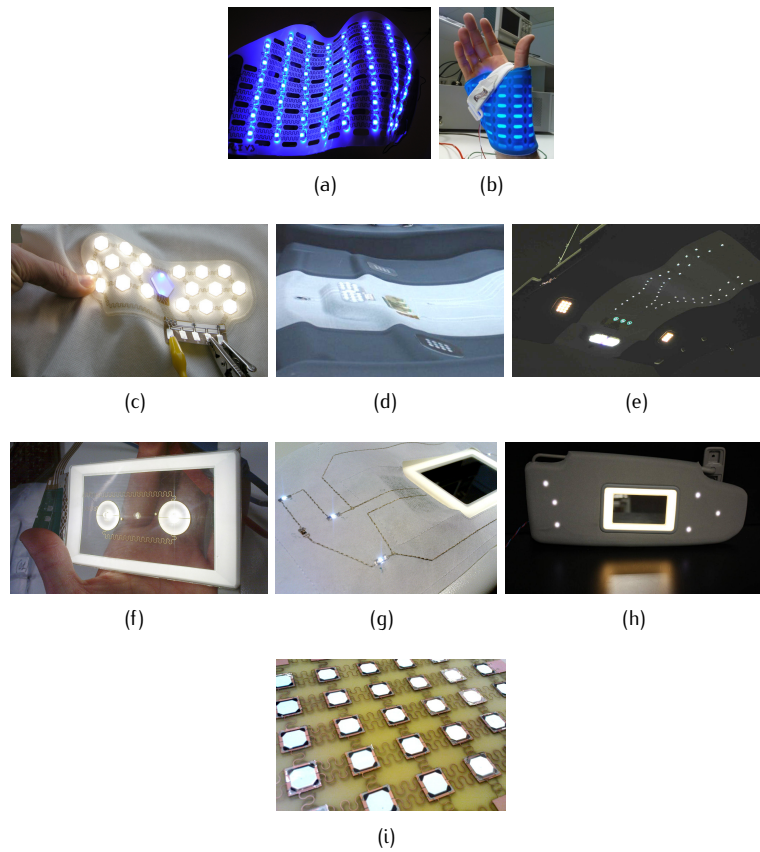
searched, pain relief - the blue light emitting devices aspire to open up a large market for conformable devices along with an increasing number of applications where also other visible wavelengths are of use. Because one can expect the treatments to demand rather long, continuous exposures to take effect while maintaining safety, the ability to make the light sources wearable is of evident benefit to user comfort, but also to treatment efficiency (less light spilling out). One example is the RSI (Repetitive Strain Injury) demonstrator that uses SMI technology to interconnect a matrix of power LEDs in a soft, flexible and stretchable manner. By fitting the device inside a textile wrap, a soft and comfortable wrist patch was obtained (Fig.1(b)). After 10% tensile elongation of all the device electrical interconnects, repeated in 120 000 cycles we found just about 1% relative efficiency loss in the unit. Beside reliability, the challenge in this application was to maximize the light flux toward the skin while protecting it from overheating by use of efficient LEDs and a combination of PDMS materials that allow high blue transmission and increased thermal conductivity where needed. This is necessary to stay inside the skin thermal safety zone that lays below 42°C.

**Automotive lighting:** In automotive applications conformability of light sources offers different benefits. Usually, only one time deformation is expected of the device. This is exploited during manufacturing to allow integration over non planar surfaces of the interior- Fig.1(d). It can be achieved through integration with a smart textile that can also be a carrier for additional functionality (Fig.1(g)). The challenge in this field lies in harsh working conditions due to temperature cycling and humidity presence inside an automobile. This corresponds to a series of demanding environmental tests (e.g. temp cycling -40,+65°C or long term 93%RH exposure) all interior circuits need to pass in order to comply with the automotive standards (ISO 16750:2003). The benefit of SMI here is that it uses off-the-shelf components that can be selected as automotive grade to start with. Additionally, the PDMS encapsulation improves components protection even further. At the same time the in-coupling losses due to Fresnel reflection are negligible because there is no air gap between the LED and the SMI encapsulation realized by injection molding. (Modern LEDs lenses are made of PDMS so the refractive index difference rel. to encapsulation is minimal, which helps even further.) This also removes the need for close tolerance alignment of the LED and the light guide in most cases (LED is embedded inside the lightguide). Another threat to the optical systems comes from the UV exposure. However, where many polymer light-guiding materials are known to yellow (e.g. aromatic polyurethanes), PDMS passes Xenon lamp tests without any trouble. One downside is the thermoset nature of PDMS, making it trickier to lock it into a distinct, permanent shape compared to thermo-formable materials.

**OLED lighting:** The flexible OLED concept continues to struggle due to lack of an effective, plastic humidity barrier. While the resulting reliability challenges are being tackled, the limited availability of a stable OLED reflects in relatively small coverage of this new and special component throughout this

work. Nevertheless the two use cases provided deliver initial insights that conformable lighting will inevitably benefit from flexible OLED availability. This is due to the possibility to create extremely low profile and lightweight devices (eg. Fig.1(i)). The fact that OLED will be capable of serving lighting applications as a direct light source could benefit the efficacy of complete systems to a point of high competitiveness even against LEDs that produce more Lumens/Watt, but rarely maintain that efficacy in the end application. This is because LED is a point-source which can not do without (lossy and thick) diffusers and reflectors whenever appliance light reaches the human eye directly. Additionally, the ability to design the shape of the active area of the OLED according to need can yield extremely simple, lightweight devices of unmatched optical (and thermal) homogeneity. All these added values come at virtually no additional optical modeling effort or efficacy loss- all common issues in quality LED luminaire design. This said, trade-offs and significant barriers in using OLEDs for certain applications are very real (eg. the Renal Monitor device introduced in chapter 8), suggesting that the OLED and LED will not compete as much as dominate in specific applications each.





*Figure 1: a) RSI wrist therapy stretchable light engine b) RSI light engine and its textile wrap worn on hand c) Automotive interior conformable Courtesy Light module integrated with a textile carrier and integrated into a car headliner (d). e) Highly integrated headliner composed of different conformable electronic systems (Courtesy of Grupo Antolin). f) Vanity Light module with embedded LED sources. g) Vanity Light integrated with a decorative textile circuit. h) Complete sun-visor demonstrator (Courtesy of Grupo Antolin). i) Flexible OLED matrix with stretchable interconnections (TNO HOLST | CMST | IMEC).*