

De slimme contactlens: van een artificiële iris
tot een contactlensbeeldscherm

The Smart Contact Lens: from an Artificial Iris
to a Contact Lens Display

Jelle De Smet

Promotoren: prof. dr. ir. H. De Smet, dr. ir. D. Cuypers
Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van
Doctor in de Ingenieurswetenschappen

Vakgroep Elektronica en Informatiesystemen
Voorzitter: prof. dr. ir. J. Van Campenhout
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2013 - 2014



Summary

Regular, passive contact lenses are ophthalmic devices used to correct vision disorders such as myopia and hyperopia. From their inception in 1888, research efforts were focused on increasing their comfort, performance and ease of manufacturing, but their purpose rarely diverted to other applications than vision correction. However, after World War II, a new use found its way into the lab when one sought to extend their function by integrating electronic components. Unfortunately, none of the initial efforts resulted in a successful implementation beyond research prototyping. In retrospect, it seems the major limiting factor was a lack of adequate microfabrication technologies for constructing the micro-electronic components themselves and for successfully embedding them in a contact lens. However, around 2000 these technologies appeared to have caught up with the ideas and designs of several researchers and a new upsurge in electronic contact lens studies has since been seen.

The application domains of these so-called 'smart' contact lenses have up till now been mainly limited to biomedical sensing and augmented reality. While the added value of augmented reality is less clear at this point and certainly needs much more research, the opportunities for biomedical sensing are more obvious and are likely to expand in the coming years. Strangely, it appears one large application domain has not been investigated yet, namely vision correction. Conventional contact lenses were specifically developed to correct ophthalmic disorders such as myopia and hyperopia, but the question emerges whether smart contact lenses can outperform them in terms of vision correction. After an initial round-up of existing research and the identification of potential future applications in the domain of active vision correction, a clear starting point was found: the development of a basic non-emitting electro-optic technology which could be integrated into a contact lens.

After an initial survey of existing display technologies, we found that LCD technology provides the best fit with the desired properties for integration into a

contact lens. However, it was recognized from early on that conventional polarizers are generally too thick for contact lens embedding, suggesting a polarizer-free LCD technology should be investigated first. For this purpose, guest-host liquid crystal displays were deemed to be the best choice.

The focus of this work thus became the design and fabrication of a spherically conformed LC cell. Since this is a special kind of flexible display, existing manufacturing techniques for flexible displays were explored, resulting in a first prototype. This revealed a straightforward implementation is not possible, as application specific issues such as poor optical uniformity, lack of precise control of the dimensions and the appearance of wrinkles impede a successful integration into a contact lens. Furthermore, the yield of our process was low due to the initially used processing techniques.

Therefore, new processing techniques were created to improve the yield and manufacturability while the inclusion of an additional photolithographic layer allowed us to address other pending issues such as the optical uniformity and the need for a precisely dimensioned glue joint. A finger pattern in this layer reinforced the filling entrance while an in-depth study exposed the relationship between the thickness of the used PET-films and the formation of wrinkles. A smooth cell with a thickness of 135 μm was established by using an asymmetric configuration with a thin layer at the convex side and a thicker but threshold dependent layer at the concave side, thereby reaching our target thickness of below 140 μm . This smooth 50 μm convex – 75 μm concave configuration was therefore used as the standard configuration in the remainder of this work.

To create an active LC cell, both an alignment and a transparent conductive layer was integrated in the cell. An obliquely evaporated SiO_2 -layer was selected and used as a contact-free, low-temperature alignment layer. Due to the delicate nature of the SiO_2 -layer, it was applied after deposition and patterning of the photolithographic spacers, which resulted in small transient alignment zones near to the spacers. Since ITO proved to be too brittle for the molding process, the transparent conductive polymer PEDOT:PSS was chosen as an alternative. This required the addition of a barrier layer in between PEDOT:PSS and the photolithographic layer, as the development process of the photolithographic layer was disturbed by the presence of the PEDOT:PSS.

With the electro-optic effect established, the quality of the mold was found to be important to achieve a good uniformity across the cell while a sufficiently high spacer density also proved to be necessary. Different patterning techniques for the PEDOT:PSS layer were investigated and were mainly based on laser ablation. Even after optimization, minor damage to the underlying PET-films could not be

avoided, apparently affecting the alignment of the LC molecules. The isolation technique, having the smallest footprint, led to good patterned cells and was thus deemed as a viable technique for PEDOT:PSS patterning.

To investigate the performance boundaries of the guest-host technology, an in-depth study was performed on the influence of the twist and the dye concentration on the electro-optical response of the LC cell. This revealed a 180° twist results in the best contrast while still being practically implementable. Although increasing the dye concentration does indeed lead to an improved contrast, this also increases the threshold voltage and the saturation voltage and a trade-off should thus be considered.

With an optimized mixture, the LC cell was fully characterized, giving special attention to the transition between glass test cells and the LC cell. Transmission-voltage measurements and switching speed measurements indicated the cell gap of the LC cell was lower than intended, which was confirmed by cell gap measurements. This indicated the height of the photolithographic spacer should be carefully monitored during fabrication. Even then, contrast and switching speed were only moderate, which might hamper use of the LC cell for some applications. An initial study concerning the integration of polarizers revealed PVA based polarizers are too thermally unstable to be integrated into contact lenses. Thin film polarizers seem to be a good alternative and should be the subject of future research.

With the basic technology established and characterized, the first applications could be explored. For use as an artificial iris, the LC cell was adapted and new features such as a central hole for increased biocompatibility were added. Alignment markers were added as the high number of pixels - up to nine in our prototypes - required careful alignment. A new flexible connector based on commercial copper clad laminates was developed to drive the different pixels. By consecutively switching on and off the concentric pixels, iris constriction and dilation could be successfully mimicked. A crossover was also implemented as this allows to bring all necessary connections to one side of the substrates. The deposition process of the flexible conductive glue was, however, not well controlled and could lead to unwanted connections deteriorating the contrast of the pixels. Although further work should address this problem, the artificial iris seems well suited as a first application for this newly developed technology.

Another application in the vision correction domain is a smart contact lens for presbyopia. Therefore, its use in a smart contact lens with multifocal functionality was studied, but since this is currently the subject of a patent application, no more information can be disclosed here.

For the final application, a contact lens display for augmented reality, it was quickly realized that pixels residing just in front of the cornea cannot be seen clearly as they are beyond the eye's minimal focussing limit. Exploratory simulations indicate that even under ideal circumstances a classical approach using integrated microlenses could likely lead to projected spot sizes as large as 0.4 mm. This would mean only about 4 by 4 pixels could be projected in the region with highest acuity, allowing the projection of only very simple patterns. Therefore, it seems before any display technology should be further investigated for application as a contact lens display, a more in-depth study is needed on how a highly detailed image can be projected onto the fovea. It remains to be seen whether LCD technology can be used for this purpose as it is the proven optical concept which will probably dictate which technology one should opt for.

To conclude, we have shown for the first time it is possible to create a non-emitting electro-optic technology that can be integrated into a contact lens. This milestone brings us one step closer to a new generation of contact lenses, potentially leading to breakthrough applications in biomedical and augmented reality fields.

Samenvatting

Gewone, passieve contactlenzen zijn ophthalmologische hulpmiddelen die worden gebruikt om visuele aandoeningen zoals myopie en hyperopie te corrigeren. Vanaf hun totstandkoming in 1888, richtte aangaand onderzoek zich voornamelijk op het verhogen van comfort, performantie en gemak van fabricatie, maar hun gebruiksdoeleinde week zelden af naar toepassingen buiten visuele correctie. Echter, na Wereldoorlog II, vonden nieuwe gebruiken hun weg naar het labo wanneer men trachtte hun functie uit te breiden door elektronische componenten te integreren. Helaas leidde geen enkel van deze initiële betrachtingen tot een succesvolle implementatie buiten het onderzoekslabo. Achteraf bekeken lijkt het ernaar dat de grootste limiterende factor het gebrek was aan afdoende microfabricatietechnieken om de micro-elektronische componenten zelf te construeren en om deze succesvol in een contactlens in te bedden. Echter, rond het jaar 2000 bleken deze technologieën zich bijgebeend te hebben met de ideeën en ontwerpen van verscheidene onderzoekers en een nieuwe opleving van studies betreffende elektronische contactlenzen werd sindsdien geobserveerd.

De toepassingsgebieden van deze zogenaamde 'slimme' contactlenzen worden tot nu toe uitgemaakt door biomedische detectie en verhoogde realiteit. Hoewel de toegevoegde waarde van verhoogde realiteit minder duidelijk is en zeker nog verder onderzoek nodig heeft, zijn de opportuniteiten voor biomedische detectie duidelijker en zullen deze de komende jaren toenemen. Vreemd genoeg blijkt één groot toepassingsgebied nog niet onderzocht te zijn, namelijk visuele correctie. Conventionele contactlenzen werden specifiek ontwikkeld om ophthalmologische aandoeningen te corrigeren zoals myopie en hyperopie, maar de vraag rijst waar slimme contactlenzen gewone contactlenzen kunnen overtreffen op het gebied van visuele correctie. Na een initiële prospectie van bestaand onderzoek en de identificatie van potentiële toekomstige toepassingen op het gebied van actieve visuele correctie, werd er een duidelijk startpunt gevonden: de ontwikkeling van een nietemitterde elektro-optische basistechnologie dewelke in een contactlens

geïntegreerd kan worden.

Na een initiële studie van bestaande beeldschermtechnologieën, vonden we dat vloeibaarkristalbeeldscherm-technologie het best overeenkomt met de gewenste eigenschappen voor integratie in een contactlens. Echter, het werd al snel erkend dat conventionele polarisatoren over het algemeen te dik zijn voor inbedding in een contactlens, wat suggereert dat een polarisatorvrije vloeibaarkristalbeeldscherm-technologie eerst onderzocht moest worden. Hiervoor werd het gast-gastheer-vloeibaarkristalbeeldscherm als het meest geschikt bevonden.

Dit werk was dus hoofdzakelijk gericht op het ontwerp en de fabricage van een sferisch gevormde vloeibaarkristalcel. Aangezien deze cel een bijzondere vorm van flexibel beeldscherm is, werden bestaande technieken om flexibele beeldschermen te vervaardigen onderzocht, hetgeen heeft geleid tot een eerste prototype. Hierbij werd snel duidelijk dat een rechtlijnige implementatie niet mogelijk is omdat toepassingsgebonden problemen zoals een zwakke optische uniformiteit, een gebrek aan nauwkeurige controle van de verschillende dimensies en het verschijnen van rimpels succesvolle integratie in een contactlens verhinderen. Bovendien was het rendement van het proces laag omwille van de initieel gebruikte productietechnieken.

Om die redenen werden nieuwe productietechnieken opgezocht om het rendement en de maakbaarheid te verbeteren, terwijl het gebruik van een bijkomende fotolithografische laag toeliet andere problemen aan te pakken, zoals de optische uniformiteit en de nood om de lijmnaad nauwkeurig te dimensioneren. Een vingervormig patroon in deze laag versterkte de vulingang terwijl een diepgaand onderzoek de relatie naar voor bracht tussen de dikte van de gebruikte PET-films en het ontstaan van rimpels. Door het gebruik van een asymmetrische samenstelling bestaande uit een dunne laag aan de convexe zijde en een dikkere maar drempelafhankelijke laag aan de concave zijde, werd een gladde cel gecreëerd met een dikte van 135 μm . Hiermee werd ons doel bereikt om een dikte beneden de 140 μm te verkrijgen. Bijgevolg werd deze gladde 50 μm convexe – 75 μm concave configuratie gebruikt als de basisconfiguratie voor de rest van dit werk.

Om een actieve vloeibaarkristalcel te creëren, werd er een aligeringsslaag en transparante, geleidende laag geïntegreerd in de cel. Een schuinopgedampte SiO_2 -laag werd geselecteerd en gebruikt als een contactloze, lagetemperatuur aligeringsslaag. Door de delicate aard van de SiO_2 -laag werd deze pas na de depositie en de patronering van de fotolithografische afstandhouders aangebracht, hetgeen leidde tot een kleine transiëntzone rond de afstandhouders. Aangezien ITO te bros bleek voor het vervormingsproces, werd het transparante geleidende

polymeer PEDOT:PSS gekozen als alternatief. Dit leidde tot het gebruik van een additionele barrièrelaag tussen het PEDOT:PSS en de fotolithografische laag, omdat de ontwikkelingsproces van de fotolithografische laag verstoord werd door het PEDOT:PSS.

Na de verwezenlijking van het elektro-optische effect werd er gevonden dat de kwaliteit van de mal erg belangrijk was om een goede uniformiteit te verkrijgen over de hele cel, terwijl de voldoende hoge afstandshoudersdensiteit ook belangrijk bleek. Verscheidene patroneringstechnieken voor het PEDOT:PSS werden onderzocht en waren voornamelijk gebaseerd op laserablatie. Zelfs na optimalisatie kon lichte schade aan de onderliggende PET-films niet vermeden worden, hetgeen blijbaar de alignering van de vloeibaarkristalmoleculen beïnvloedde. De isolatietechniek, dewelke ook de kleinste voetafdruk bezat, leidde tot goed gepatroneerde cellen en werd dus als een afdoende techniek voor de patronering van PEDOT:PSS geacht.

Om het performantiebereik van de gast-gastheertechnologie te onderzoeken, werd er een diepgaande studie uitgevoerd naar de invloed van de draaiing en de kleurstofconcentratie op de elektro-optische respons van de vloeibaarkristalcel. Deze onthulde dat een draaiing van 180 graden resulteerde in het beste contrast terwijl deze ook nog praktisch implementeerbaar was. Alhoewel het verhogen van de kleurstofconcentratie inderdaad leidt tot een verbeterd contrast, leidt dit ook tot het verhogen van de drempelspanning en de saturatiespanning en dient een afweging gemaakt te worden.

Met een geoptimaliseerd mengsel werd de cel volledig gekarakteriseerd, waarbij specifieke aandacht ging naar de overgang van glazen testcellen naar de vloeibaarkristalcellen. Transmissiespanning-metingen en schakelsnelheidsmetingen gaven aan dat celhoogte lager dan voorzien was, hetgeen bevestigd werd door celhoogtemetingen. Deze wezen aan dat de hoogte van de fotolithografische afstandshouders oplettend in het oog moet gehouden worden tijdens het fabricageproces. Zelfs dan nog bleek het contrast en de schakelsnelheid slechts een matige waarde te hebben, hetgeen het gebruik van de vloeibaarkristalcel voor sommige toepassingen kan verhinderen. Een intiële studie van de integratie van polarisatoren toonde aan dat PVA-gebaseerde polarisatoren waarschijnlijk thermisch te onstabiel waren om geïntegreerd te worden in contactlenzen. Dunnefilm polarisatoren lijken een goed alternatief te zijn en zouden in de toekomst onderzocht moeten worden.

Na de verwezenlijking en de karakterisatie van de basistechnologie, konden de eerste toepassingen verkend worden. De vloeibaarkristalcel werd aangepast voor het gebruik als een artificiële iris en nieuwe kenmerken zoals een centrale holte

voor verhoogde biocompatibiliteit werden toegevoegd. Aligneringsmarkeringen werden toegevoegd omdat het hoge aantal pixels - tot en met negen in onze prototypes - speciale aandacht vereiste. Een nieuwe, flexibele connector gebaseerd op met koper bekleden laminaten werd ontwikkeld om de verscheidene pixels aan te sturen. Door de concentrische pixels opeenvolgend aan en af te zetten, kon de irisconstrictie en -dilatatie nagebootst worden. Een elektrische overbrugging werd ook geïmplementeerd omdat dit toeliet om alle nodige verbindingen aan één kant van de substraten te brengen. Het depositieproces van de flexibele, geleidende lijm was echter weinig controleerbaar kon leiden tot ongewenste verbindingen, hetgeen nadelig was voor het contrast van de pixels. Alhoewel toekomstig werk dit probleem zou moeten aanpakken, lijkt de artificiële iris goed geschikt te zijn als eerste toepassing van deze nieuw ontwikkelde technologie.

Een andere toepassing in het gebied van visuele correctie is een slimme contactlens voor presbyopie. Hiervoor werd het gebruik in een slimme contactlens met multifocale functionaliteit bestudeerd, maar aangezien dit op dit moment het onderwerp is van een patentaanvraag, kan hierover geen verdere informatie verstrekt worden.

Voor de finale toepassing, een contactlensbeeldscherm voor verhoogde realiteit, werd er al gauw gerealiseerd dat pixels die zich net voor de cornea bevinden, niet scherp waargenomen kunnen worden aangezien zij dichterbij dan de minimale focusafstand van het oog gelocaliseerd zijn. Verkennende simulaties geven aan dat zelfs onder ideale omstandigheden, een klassieke aanpak die gebruik maakt van geïntegreerde microlenzen waarschijnlijk leidt tot een geprojecteerde spotgrootte van 0.4 mm. Dit wil zeggen dat er slechts 4 bij 4 pixels geprojecteerd kunnen worden in het gebied met de grootste visuele acuïteit, wat enkel de projectie van eenvoudige patronen toelaat. Daarom lijkt het aangewezen dat, vooraleer beeldschermtechnologieën verder onderzocht worden als toepassingen in een contactlensbeeldscherm, er een diepgaande studie nodig is over hoe een gedetailleerd beeld op de fovea geprojecteerd kan worden. Het valt af te wachten of vloeibaarkristalbeeldscherm-technologie gebruikt kan worden voor dit doel, aangezien het bewezen optische principe waarschijnlijk zal dicteren welke technologie het meest geschikt is.

Om te concluderen, hebben we voor het eerst aangetoond dat het mogelijk is om een nietemitterende, elektro-optische technologie te creëren die geïntegreerd kan worden in een contactlens. Deze mijlpaal brengt ons één stap dichterbij tot een nieuwe generatie contactlenzen, dewelke potentieel kan leiden tot doorbraaktoepassingen in biomedische- en verhoogderealiteit-domeinen.