

Development of a Stretchable Platform
for the Fabrication of Biocompatible Microsystems

Ontwikkeling van een rekbaar platform
voor de fabricatie van biocompatibele microsystemen

Amir Jahanshahi

Promotor: prof. dr. ir. J. Vanfleteren
Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van
Doctor in de Ingenieurswetenschappen: Elektrotechniek

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



Samenvatting

In dit doctoraatsonderzoek staat de ontwikkeling van fabricatietechnologien voor microsystemen centraal, in het bijzonder microsystemen die gebruikt zullen worden in biocompatibele en rekbaar platformen. Zulke systemen worden gebruikt in toepassingen met medische doeleinden, waardoor biocompatibiliteit vereist is. In vergelijking met rigide medische microsystemen, heeft rekbaarheid een aantal meerwaarden zoals een groter gebruikscomfort voor patiënten, of de mogelijkheid tot het nauw aansluiten van elektronica aan willekeurige vormen (merk op dat biologische oppervlakken zoals de huid bijna nooit vlak zijn). Zoals opgemerkt kan worden door het aantal stijgende publicaties, is rekbaarheid van conventionele, rigide elektronica een onderwerp dat meer en meer interesse geniet.

Traditionele interconnecties voor rigide elektronica kunnen niet gebruikt worden in een rekbaar platform. Daarom vormt de fabricatie van rekbaar interconnecties een belangrijk onderdeel van dit doctoraatsonderzoek. Rekbaar interconnecties zijn eigenlijk niets anders dan geleidende baantjes ingebed in elastische substraten. Op dit moment vormen metalen verbindingen ingebed in polydimethylsiloxaan één van de voornaamste kandidaten. In dit proefschrift wordt een nieuwe fabricatiemethode beschreven voor 20 μm fijne, rekbaar interconnecties uit goud, waarbij gestart wordt van dubbelzijdige flexen (Cu-PI-Cu). Ook 100 μm brede interconnecties uit goud werden gerealiseerd. De rekbaar interconnecties kunnen bestaan uit één enkel baantje, maar ook verscheidene parallelle baantjes zijn mogelijk. Verscheidene versies werden gefabriceerd in het kader van dit proefschrift, en worden dan ook beschreven. Ook de voordelen en nadelen van elk van deze interconnecties worden beschreven. De dubbelzijdige flexen zijn commercieel beschikbaar en dus kost-effectief, wat een bijkomend voordeel is van deze technologie. Om de robuustheid van de rekbaar interconnecties te bestuderen werden cyclische vermoeidheidstesten uitgevoerd. De resultaten toonden aan dat de rekbaar interconnecties zelfs na 100 000 keer rekken aan 40 % volledig functioneel blijven. Naast de uitstekende robuustheid van de interconnecties gemaakt met deze fabricatietechnologie, zijn de mogelijkheid tot fijne patronen en biocompatibiliteit toegevoegde waarden die de weg naar rekbaar elektronica voor medische doeleinden vrijmaken.

Het is bovendien mogelijk om elektronische componenten te integreren met deze technologie van rekbare interconnecties. Om dit aan te tonen, werd een rekbare LED matrix ontwikkeld. Hierbij werden zogenaamde “surface mount” LEDs verbonden door middel van rekbare interconnecties die konden uitgerekt worden tot 60 %. Op analoge manier kunnen andere types elektronische componenten geïntegreerd worden.

Naast rekbare interconnecties werden ook tal van andere technologieën en componenten ontwikkeld. Polydimethylsiloxane (PDMS) is een gekend polymeer dat vooral gebruikt wordt om circuits of componenten in te bedden. In de context van dit werk hebben we voor een biocompatibele versie van dit materiaal gekozen om biomedische toepassingen mogelijk te maken. Hoewel het proces om PDMS structuren te repliceren gekend is, moesten extra technieken ontwikkeld worden om bijvoorbeeld micro-kleppen of micro-pompjes te realiseren. Het onderzoek uitgevoerd in deze thesis is 2-ledig:

- ontwikkelen van nieuwe, aangepaste fabricage technologieën om PDMS te structuren.
- ontwikkelen van micro-componenten die gebruik maken van deze speciaal aangepaste technologieën.

Fabricatietechnologieën werden ontwikkeld om PDMS-membranen te produceren met diktes van minder dan 10 μm tot enkele millimeters. Onder andere spin coating, doctorblading en hot embossing werden gebruikt om deze verscheidene diktes te bekomen. Dergelijk dun membraan kan achtereenvolgens worden opgenomen, verplaatst, gealigneerd en gehecht. Het gefabriceerde membraan kan gepatroneerd worden of niet. Ook werden er fabricatieprocessen opgesteld om dwarsverbindingen in de PDMS-membranen te maken. Deze verbindingen worden voornamelijk gemaakt door hot embossing. Volledige details over de fabricatie en karakterisatie worden vermeld. In dit proefschrift zijn de PDMS-fabricatietechnologieën de sleutelfactoren om microcomponenten te realiseren.

Transversale electro-osmose micropompen en PDMS unidirectionele kleppen werden gerealiseerd aan de hand van ontwikkelde technologieën. In dit proefschrift wordt een flexibele micropomp gerealiseerd die geschikt is voor de afgifte van medicatie in het lichaam. Omdat enkel PDMS elastomeren die geschikt zijn voor implantatie en gouden elektrische interconnecties werden gebruikt, heeft de realisatie een hoge graad van biocompatibiliteit. Het

werkingsprincipe van de micropomp is gebaseerd op transversale DC electro-osmose die een nieuwe variant is van de vaak toegepaste hoge spannings DC electro-osmose.

Deze nieuwe techniek steunt op het gebruik van onregelmatigheden die in de topografie van het kanaal worden aangebracht, wat leidt tot een niet-uniforme verdeling van de ladingsverdeling. Het voordeel is dat een micropomp kan worden aangestuurd met een relatief lage DC spanning van 10 V waarbij een partikel mobiliteit van $60 \mu\text{m s}^{-1}$ kan worden bereikt. Om de mobiliteit te karakteriseren, werden gekleurde partikels met diameter $3 \mu\text{m}$ in de gebruikte vloeistof aangebracht waarbij hun snelheid met de lijnscantechniek werd geanalyseerd aan de hand van confocale microscopie. De volledige karakterisatie wordt in dit proefschrift besproken. Er werd opgemerkt dat de partikelstroom een spiraalvormig profiel heeft, wat een interessante eigenschap is om een efficiënte micro-mixer te maken voor actieve microfluidische en μ -TAS applicaties.

Een volgend deel van het werk dat hier gepresenteerd wordt is het vervaardigen van normaal gesloten microkleppen. Dergelijke terugslagkleppen zijn van groot belang in medische toepassingen. De welbekende statische wrijving tussen twee PDMS oppervlakken werd verminderd aan de hand van oxidatie van het PDMS. Het ontwerp, het produceren en het karakteriseren van een normaal gesloten, volledig op polymeer gebaseerde microklep wordt uitvoerig beschreven. De microklep heeft een diameter van 5 mm en een dikte van 3 mm en is volledig uit biocompatibel PDMS vervaardigd. De benodigde druk voor het openen van de klep, welke afhankelijk is van de adhesie tussen de bewegende onderdelen, werd verminderd tot 3.4 kPa dankzij het gebruik van oppervlakteoxidatie van het PDMS. Deze aanpak, in combinatie met het selectief bonden van een polyethyleen terephthalate (PET) schaduwmasker, laat toe om eveneens microkleppen voor hoge tegendruk te realiseren. Zelfs bij 0.6 MPa tegendruk, welke de maximale druk is die aangelegd kan worden, kon er geen vloeï vastgesteld worden. De gerealiseerde microklep heeft een minimale vloeï van 1 ml min^{-1} .

Vele andere biomedische toepassing kunnen eveneens gerealiseerd worden op basis van de ontwikkelde technologieën. Het werk dat in deze thesis gepresenteerd wordt, past in het kader van biocompatibele en rekbare technologieplatformen. Deze zijn voornamelijk gebaseerd op PDMS in combinatie met metalen elektrodes.

Summary

The focus of this PhD thesis is on the development of technologies for the fabrication of microsystems. More specifically, microsystems that are going to be used in a biocompatible and stretchable platform. The aim for the device is to be used in medical applications due to which biocompatibility is a necessity. Compared to rigid medical microsystems, stretchability has added values such as: ease of use for patients or application on curvilinear surfaces (note that biological surfaces like skin are almost never flat). Stretchability of conventional rigid electronics is a hot topic in recent literature as can be seen by the number of publications.

For a stretchable platform conventional rigid interconnects can not be used. Fabrication of stretchable interconnects has been one of the main works in this thesis. By a loose definition, stretchable interconnects are basically conductor lines embedded in elastomer substrates. Currently, metal interconnects embedded in polydimethylsiloxane are one of the major candidates. In this thesis, a novel straightforward method is presented that allows the fabrication of narrow 20 μm wide stretchable gold interconnects starting from double sided flexes (Cu-PI-Cu). Wider 100 μm gold interconnects have also been fabricated. The stretchable interconnects can be a single track of conductor or multiple parallel tracks. Different versions have been fabricated and presented in this thesis. Advantages and disadvantages of each have also been discussed. The starting double sided flexes are available commercially for a low cost which is another bonus of this technology. Cycling fatigue tests have been performed to verify the reliability of the stretchable interconnects. The results have shown that the stretchable interconnects are fully functional even after a minimum of 100 000 cycles at 40 % elongation. In addition to the outstanding reliability in this method of fabrication, fine pitch and biocompatibility are the added values paving the way for medical grade stretchable electronics.

It has been shown that integration of electrical printed circuit board components using the developed stretchable interconnect technology is possible. To demonstrate this, a stretchable array of LEDs has been fabricated. Surface mount LEDs are connected using the stretchable interconnect technology and are elongated up to 60 %. Other surface mount electronic components can be

integrated using the same principle.

Apart from the stretchable interconnects, several other technologies and components have been developed. Polydimethylsiloxane (PDMS) is a widely used elastomer mainly known for encapsulation and moulding purposes. We have chosen biocompatible versions of this material for the fabrication of the components that are going to be used in the stretchable platform. Although the soft-lithography process for casting PDMS is a known process in literature, to fabricate for instance microvalves or micropumps in this material, other fabrication technologies are needed as becomes more clear in this thesis. The work which is done in this thesis is twofold:

- Developing novel fabrication technologies to form PDMS into various shapes.
- Fabricating microcomponents using the custom made fabrication technologies.

Fabrication technologies have been developed to make PDMS membrane thicknesses from less than 10 μm to millimeter range. Namely spinning, doctorblading and hot embossing have been used to fabricate various thickness PDMS membranes. The thin membrane can be picked, transported, aligned and bonded correspondingly. The fabricated membranes can be patterned or non patterned. Fabrication processes have been developed to make through layer features in PDMS membranes as well. Through layer holes are mainly done using the hot embossing technique. Full details of the fabrication and characterization are provided. In this thesis, PDMS fabrication processes have been our enabling factor to realize micro components.

Transverse electroosmosis micropump and PDMS check valves have been fabricated using the developed fabrication technologies. In this thesis, a flexible micropump is fabricated which is aimed to be suitable in drug delivery applications. It provides a relatively high degree of biocompatibility, since the only employed materials are implantation grade polydimethylsiloxane elastomer and gold for the electrical interconnects. The working principle of the micropump is based on transverse DC electroosmosis which is a new variant of conventionally applied high voltage DC electroosmosis. This new technique is based on topography irregularities introduced in the channel resulting in a non-uniform charge distribution. The advantage is to drive the micropump using a relatively low DC voltage of 10 V while getting an effective flow speed

of $60 \mu\text{m s}^{-1}$. In order to characterize the flow speed, dyed $3 \mu\text{m}$ beads are dispersed in the working fluid and their speed is measured by the line scanning technique using a confocal microscope. The full characterization process is discussed in the thesis. It is also observed that the flow has a helical profile which is an attractive feature for an efficient micromixer in active microfluidics and μ -TAS applications.

Another work which was mentioned is the fabrication of normally closed (NC) microvalves. NC check valves are of high importance in any medical device for leakage safety reasons. To do this, PDMS oxidation is used to reduce the notorious PDMS to PDMS stiction. The fabricated microvalve is composed of only PDMS. The design, fabrication and characterization of the NC all-polymer membrane-type microvalve is described. The microvalve with a diameter and thickness of 5 mm and 3 mm, respectively, is fabricated completely in biocompatible polydimethylsiloxane (PDMS). The opening pressure, which depends on the adhesion between the membrane and the slab, is reduced to the noticeably low value of 3.4 kPa by the surface oxidation of the PDMS layers. This technique in combination with a selective bonding by Polyethylene terephthalate (PET) shadow masking allows for the fabrication of a high reverse pressure microvalve. Up to 0.6 MPa reverse pressure, which was the maximum pressure that we could apply manually, no flowrate was observed. The presented microvalve features a minimum flow rate of 1 ml min^{-1} .

Using the developed technologies many other biomedical applications can be realized. All in all, the work which is done in this thesis can be viewed in the framework of biocompatible stretchable platforms. The platform mainly consists of PDMS and metal electrodes.