

Fotonische huid gebaseerd op integratie van optische sensoren
en uitleeseenheden in polymere substraten

Photonic Skin Based on Polymer Embedding of Optical Sensors
and Interrogation Units

Bram Van Hoe

Promotoren: prof. dr. ir. G. Van Steenberge, prof. dr. ir. P. Van Daele
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

Het beginpunt van dit proefschrift zijn drie belangrijke trends binnen de hedendaagse onderzoekswereld. De eerste trend is gelinkt aan de snelle opmars van draagbare, kleine of soms zelfs onzichtbare toepassingen waarvoor steeds verder geminiaturiseerde technologische bouwblokken nodig zijn. Voorbeelden van dergelijke toepassingen vinden we onder meer in smartphones, tablets en smart TV’s die de gebruiker in een oogwenk toegang verschaft tot sociale media, persoonlijke muziek en dataopslag. Ook toepassingen om allerlei functies van het menselijk lichaam te monitoren maken gebruik van deze miniaturisatietrend. Denken we maar aan applicaties om ademhaling, hartslag of spierbelasting op te meten. Naast de gebruiker kan hierbij ook de behandelende arts informatie krijgen over de toestand van de patiënt. Deze miniaturisatietrend beperkt zich niet tot de consumentenapplicaties maar reikt veel verder. Andere applicaties zijn bijvoorbeeld implanteerbare systemen, ruimtevaarttoepassingen of het monitoren van de integriteit van bruggen en gebouwen. Gebruikers van al deze toepassingen zijn steeds op zoek naar lichtere en kleinere meetsystemen.

Een tweede belangrijke pijler voor deze doctoraatsthesis is het toenemend gebruik van sensoren in allerlei soorten toepassingen. Micro’s en camera’s zijn enkele van de meest gekende sensorapplicaties. Recentere voorbeelden vinden we bijvoorbeeld in de automobielandustrie, zoals parkeer- of neerslagsensoren. Verder zijn ook touchscreens, RF-IDs en anti-diefstalsystemen populaire sensorapplicaties. Zulke “artificiële zintuigen” bootsen één van de vijf menselijke zintuigen na en maken tegenwoordig deel uit van ons dagelijks leven, vaak zonder dat we er ons van bewust zijn.

Een derde trend is de invoering van fotonische systemen. Deze systemen zijn gebaseerd op de propagatie van licht, door lichtdeeltjes (fotonen) te gebruiken als informatiedrager of als sensormedium. Fotonische of optische sensoren bezitten verschillende unieke eigenschappen die hen een concurrentieel voordeel opleveren ten opzichte van de traditionele, elektronische sensoren. Het meten van de sensorrespons gebeurt namelijk door een wijziging van de eigenschappen van licht dat propageert in een optisch medium, bijvoorbeeld een optische vezel. Enkele voorbeelden van deze voordelen zijn hun gevoeligheid, immuniteit voor elektromagnetische interferentie en het inerte karakter van de sensoren. Daarnaast laten hun laag gewicht, beperkte grootte (dimensies van een optische vezel

zijn vergelijkbaar met een menselijk haar) en robuustheid ook toe ze in te zetten binnen omgevingen waar geen, of slechts onder zeer strikte voorwaarden, elektrische toepassingen mogen worden gebruikt (bijvoorbeeld bij hoge temperatuur of druk). Optische vezelsensoren in het bijzonder laten op een zeer eenvoudige wijze multiplexing toe en bieden de mogelijkheid tot een lagere productiekost. Het gebruik van fotonische systemen beperkt zich niet tot sensortoepassingen. Ze zijn alomtegenwoordig in dagdagelijkse toepassingen maar worden ook nog zeer intensief onderzocht in de wetenschappelijke wereld. Een aantal voorbeelden hiervan zijn verlichting, metrologie, spectroscopie, holografie, chirurgie en laser ablatie van materialen.

We vestigen nu de aandacht op geminiaturiseerde optische sensoren die met behulp van de hierboven beschreven recente technologische ontwikkelingen werden ontworpen. Deze optische sensorsystemen, en in het bijzonder de optische vezelsensoren, bieden zoals eerder vermeld een brede waaier aan voordelen die hen multifunctioneler maken tegenover hun elektronische tegenhangers. Hoewel er dus een enorm potentieel is, blijft het marktaandeel van optische sensoren echter nog steeds beperkt. Binnen dit doctoraatsonderzoek is het dan ook de bedoeling een aantal van de traditionele showstoppers weg te nemen en de toepasbaarheid van optische sensoren te vergroten. Op verschillende gebieden, onder andere optische koppeling, efficiënte overdracht van rek of andere sensorparameters, verpakking, integratie en betrouwbaarheid, kunnen nog belangrijke stappen gezet worden. De drie eerder beschreven trends worden binnen dit doctoraat gecombineerd in een doorgedreven integratie van zowel de optische sensoren als de bijhorende opto-elektronische componenten. Het integratieproces maakt gebruik van polymere materialen en beperkt zo de dimensies van het sensorsysteem tot een minimum.

Naast de bovenvermelde uitdagingen op het gebied van optische (vezel)sensoren, is er ook nood aan performante uitleeseenheden die op dit moment vaak te groot en moeilijk te bedienen zijn. Een ander struikelblok dat vaak wordt aangehaald is de complexe installatie van deze sensoren die enkel kan worden uitgevoerd door gespecialiseerd personeel. Verder is er ook sterke competitie van de geminiaturiseerde sensoren gebaseerd op Micro-Elektromechanische systemen (MEMS). Binnen dit onderzoek gaan we daarom nog een stap verder door een flexibele of zelfs rekbare folie te ontwikkelen waarin naast alle sensoren ook de aandrijf(opto-)elektronica kan worden geïntegreerd. Zo wordt een artificiële fotonische huid gecreëerd die op of rond om het even welk oppervlak kan worden aangebracht of gewikkeld. Door het multiplexen van verschillende sensorpunten in combinatie met de integratie in polymere substraten krijgt het systeem bovendien een quasi-gedistribueerd karakter.

De integratie van optische sensoren samen met de nodige optische bronnen en detectoren levert een nieuw sensorconcept op: een fotonische huid gebaseerd op optische sensoren. Voor de eerste keer worden optische sensoren gecombineerd

met opto-elektronische componenten en ingebed in flexibele of rekbare polymeren. Dit sensorconcept vindt toepassingen in zeer verschillende ingenieursdoe-
meinen zoals de automobiellndustrie, robotica, gezondheidszorg etc. Door het
toenemend vertrouwen in de robuustheid en betrouwbaarheid van ingebedde
optische vezelsensoren vinden ze tegenwoordig ook ingang in de olie- en gasin-
dustrie.

Na de twee eerste - inleidende - hoofdstukken komt in hoofdstuk 3 de integra-
tie van optische vezelsensoren in polymere materialen aan bod. Het resultaat is
een rigide, flexibele of rekbare sensorfolie, voorzien van een ingebedde optische
vezel. Afhankelijk van de toepassing en daarmee gepaard gaande vereisten op
gebied van mechanische en ruimtelijke gevoeligheid kan een inbedmateriaal met
verschillende mechanische eigenschappen worden gekozen. Ormocer (een pro-
duct van Micro resist technology) is een materiaal dat vaak wordt gebruikt als
circulaire coating voor een optische vezel. Binnen dit doctoraat zal het worden
aangewend als hard "huid" materiaal voor de fabricage van planaire sensorfolies.
Als rekbaar inbedmateriaal wordt een rubberachtige silicone gebruikt, PDMS.

Standaard optische vezels zijn gemaakt van glas en worden vervaardigd met een
trekproces startende van een preform. Sensoren worden vervolgens ingeschre-
ven door een invallend interferentiepatroon van een UV bron. Het resultaat is een
optische filter die een welbepaalde golflengte, variërend onder invloed van tem-
peratuur, rek en druk, reflecteert. Ook speciale types vezelsensoren met unieke
sensoreigenschappen worden gebruikt in dit proefschrift. Zo hebben polymere
vezels een hogere mechanische flexibiliteit en compatibiliteit met biomedische
toepassingen. Verder wordt ook een speciaal type glasvezel gebruikt gebaseerd
op microstructuren (luchtgaten) rond de vezelkern. Dit type vezelsensor maakt
het mogelijk de gevoeligheid van de sensor te variëren voor verschillende externe
parameters. Overspraak tussen verschillende meetgrootheden kan op deze ma-
nier worden beperkt en de gevoeligheid voor transversale rek en hydrostatische
druk kan merkbaar worden verhoogd.

Sensoren die worden gebruikt in biomedische toepassingen moeten worden inge-
bed in biocompatibele of soms zelfs implanteerbare systemen. Daarom is ook een
cilindrische versie van de inbedtechnologie ontwikkeld die het mogelijk maakt
om vezelsensoren te integreren in tubulaire systemen. Een typisch voorbeeld dat
gebruik maakt van een dergelijke technologie vinden we bijvoorbeeld terug bij
een gastroscopisch onderzoek. Bij een dergelijk onderzoek kan het monitoren
van drukgolven die propageren in de slokdarm een grote bron van informatie
zijn. Een sensorsysteem gebaseerd op verschillende meetpunten in een polymere
vezelsensor en ingebed in een flexibel cilindrisch polymeer met een diameter van
 ≈ 4.5 mm wordt ook beschreven in hoofdstuk 3. Bij het vergelijken van de presta-
ties van deze polymere vezelsensor met de standaard glasvezelsensoren, stellen
we een verhoging van de gevoeligheid met een factor 6 vast.

Net zoals elke elektronische component een elektrische voeding nodig heeft,

heeft elk optisch element een lichtbron nodig om te kunnen functioneren. Hoofdstuk 4 beschrijft de ontwikkeling van een verpakkingstechnologie voor het integreren van de nodige perifere opto-elektronische componenten. Om de mechanische flexibiliteit en compatibiliteit met fotonische huid te behouden, wordt getracht deze componenten en bijhorende verpakking zo klein en discreet mogelijk te maken. Om deze "ultra-dunne" modules te vervaardigen wordt er vertrokken van de onderzoekservaring op het gebied van het verpakken van chips, beschikbaar binnen het Centrum voor Microsysteemtechnologie (CMST) via de doctoraatsproefschriften van Wim Christiaens (ultra-dunne chip technologie), Erwin Bosman (flexibele opto-elektronische verpakking), Jeroen Missinne (aanbrengen van rekbare sensorlagen en ontwikkeling van vervormbare optische tactiele sensoren) en Rik Verplancke (verpakkingstechnologie voor rekbare microsystemen). Deze "ultra-dunne" integratiefilosofie wordt binnen dit onderzoek voor de eerste maal toegepast op chips met contactpaden op de substraatkant (achterkant van de chip). Aangezien de chips worden verdund tot 20 μm tijdens het integratieproces, wordt de achterste contactlaag ook weggenomen. Een depositie van nieuwe contactlagen met bijhorende thermische stappen is noodzakelijk om een goede werking van de chip te garanderen.

Wanneer deze opto-elektronische componenten (lasers, fotodiodes, etc.) worden gecombineerd met vezelsensoren, is het belangrijk dat de optische modestructuur overeenkomt. Daarom werden ook single-mode componenten ingebed. Een opto-elektronische verpakking met een totale dikte van 40 μm is het resultaat van dit hoofdstuk. Deze chipverpakking is voorzien van een actieve component, een heatsink en een elektrische uitwaaiëring om connectie met de buitenwereld te maken.

Hoewel het gebruik van optische vezelsensorsystemen gestaag toeneemt, blijft de systeemkost één van de grootste struikelblokken die een volledige doorbraak van deze systemen belemmert. De belangrijkste factor binnen de totale kost van een dergelijk systeem is veelal gelinkt aan de *koppeling* van optische vezels of andere lichtgeleidende structuren met bronnen en detectoren. Aligneringsnauwkeurigheden van 1 μm of zelfs minder zijn vaak noodzakelijk om het optische vermogenbudget hoog genoeg te houden. Dit brengt met zich mee dat de koppeling actief moet gebeuren door het oplichten van de optische structuren tijdens het koppelproces om zo de koppel-efficiëntie te maximaliseren. Het oplichten van elke individuele component bemoeilijkt uiteraard een efficiënt (bijvoorbeeld "roll-to-roll") fabricage proces. Het is met andere woorden van groot belang om de koppelingstructuur en -technologie de nodige aandacht te geven, zowel in de fase van het ontwerp, als bij het ontwikkelen van een prototype als bij de fabricage van optische systemen.

In hoofdstuk 5 wordt daarom een op maat gemaakte vezelkoppeltechnologie ontwikkeld om een kostenefficiënte, geïntegreerde koppeling te voorzien van een laser naar een optische vezel en van een optische vezel naar een detector. Naast

het actieve koppelingproces bestaat de belangrijkste uitdaging erin de compatibiliteit met de vlakke sensorfolies en de ultra-dunne laser- en detector- chipverpakkingen uit hoofdstuk 3 en 4 te behouden. Het resultaat is een koppelplug, bestaande uit PMMA materiaal, met een geïntegreerde spiegel op micrometer niveau aan de optische vezel. Een optische link bestaande uit een Verticaal Emitterende Laser (VCSEL), 2 vezelkoppelpluggen en een detector resulteert zo in een totaal verlies van 7 dB (volledig single-mode systeem). De PMMA plug heeft een dikte van 500 μm en is bijgevolg compatibel met de toepassingen die we voor ogen hebben, gebaseerd op het concept van de optische sensorhuid.

Alle technologieblokken, ontwikkeld binnen dit doctoraat, werden zo generiek mogelijk gehouden om op die manier de bruikbaarheid niet te beperken tot sensor-toepassingen. De karakterisatie en testresultaten zijn echter gebaseerd op optische vezelsensoren. Dergelijke volledig ingebedde systemen, bestaande uit geïntegreerde lasercomponenten, detectoren en vezelsensoren, worden beschreven in hoofdstuk 6. Een snel, kostenefficiënt en uiterst nauwkeurig interrogatiesysteem voor vezelsensoren is het resultaat (demonstratie van een dynamische sensoruitlesing aan 1 kHz en 1000 meetpunten per interrogatiecyclus). Het beperkte golflengtebereik van de lasercomponenten zorgt ervoor dat het multiplexen van verschillende sensorpunten met dit uitleessysteem de belangrijkste uitdaging blijft. Door gebruik te maken van verschillende, in parallel werkende, optische bronnen, of een speciaal type verticaal emitterende lasers (met een hoger golflengtebereik) kan dit euvel evenwel worden verholpen.

Binnen hoofdstuk 7 wordt een alternatieve optische druksensor beschreven die gebaseerd is op het meten van verticale verplaatsingen. Het principe van deze sensor is gelinkt aan het fenomeen "optische feedback" dat optreedt wanneer licht wordt teruggekoppeld in een lasercaviteit. Dit interferometrisch effect is inherent aan de laser zelf, wat ervoor zorgt dat er geen aparte sensorstructuren (bijvoorbeeld optische vezels) nodig zijn. Op deze manier wordt ook een optische koppelstructuur vermeden, wat het integratieproces merkbaar vereenvoudigt. Concreet wordt er vertrokken van ingebedde lasers (VCSELs) uit hoofdstuk 4 waar een sensor- en spiegel laag wordt aan toegevoegd. De sensor laag is een samendrukbare PDMS laag die een extern uitgeoefende druk omzet in een verandering van de caviteitslengte van de laser. De spiegel laag zorgt voor de terugkoppeling van licht in de lasercaviteit. In dit hoofdstuk worden lasercomponenten op 850 nm gebruikt die een interferometrisch signaal voortbrengen met een periode van 425 nm. Met behulp van dit sensorprincipe wordt het bijgevolg mogelijk om verplaatsingen op nanometer schaal te visualiseren. Deze sensor kan ook worden uitgelezen met een optische detector of een spectrometer. We hebben er echter voor gekozen om de uitlezing elektronisch te doen om geen extra componenten te moeten toevoegen en zo geïntegreerde metingen mogelijk te maken. Dit resulteert in een gevoeligheid van 4.71 $\mu\text{m}/\text{nm}$. Verder laat het gebruik van laserrijen op chipniveau gemultiplexte metingen met een hoge

densiteit (spatiëring tussen twee lasers is typisch $250\ \mu\text{m}$) toe. De ruimtelijke uitgestrektheid van een sensorpunt is $200\ \mu\text{m}$ (overeenkomend met een halvering van de sensorrespons).

Hoofdstuk 8 besluit deze verhandeling met een oplistijng van de belangrijkste bijdrages in verschillende branches binnen de optische sensorwereld. Ook wordt een kort overzicht gegeven van de verschillende demonstratoren die werden ontwikkeld en wordt er teruggekeken naar de initieel gedefinieerde objectieven.

Summary

The starting point of this dissertation is the observation of three major trends in today's technology research. A first trend is the evolution towards ever-smaller technology building blocks providing the necessary tools to create portable, wearable and unobtrusive applications. These applications include all kinds of "smart" devices providing instant connectedness to social media, music, personal storage, etc. Also applications developed to monitor vital human functions (respiration, heart rate, muscle overload), providing feedback to the patient but also to the treating physician, make extensive use of these recent miniaturization technology advances. This miniaturization trend is definitely not limited to consumer applications but extends much further. One can for example think of implantable devices, aerospace applications or structural health monitoring of bridges and buildings continuously seeking for lighter and smaller monitoring systems.

Next to miniaturization, a second important driver for this dissertation is the tendency to add sensing intelligence to a broad range of applications. Microphones and cameras are some of the best-known sensor applications. More recent examples include humidity sensors in car windows or proximity sensors in car hoods, but also touchscreens, RF-IDs and anti-theft systems. Such "artificial senses" are mimicking one of the five human senses. Sensors have become part of our daily life and are often being used without the awareness of the user.

A third development is the introduction of photonic systems. These systems are based on the propagation of light, using it for example as an information carrier or sensor transducer. Concerning sensing applications, the optical systems typically offer several advantages over their electrical counterparts. These are mainly related to their sensitivity, immunity to electromagnetic interference, passiveness, size, weight, resistance to harsh environments, multiplexing capabilities and potentially also cost. Photonic systems are ubiquitous in our daily life as well as in the most advanced branches of science including lighting, metrology, spectroscopy, holography, surgery, laser material processing, to name a few.

We now turn our focus to the main topic of this PhD: integrated optical sensing systems and the according interrogation technologies. Owing to the above-mentioned recent trends and associated technology advances, the emerging field of integrated optical sensing systems is rapidly developing. Although these op-

tical sensing systems, mainly based on optical fiber sensors, offer several unique advantages making them more versatile than their electronic counterparts, their market share is still significantly below its potential. Within this PhD, the aim is to remove some of the traditional issues preventing these optical sensors from penetrating the market, which include packaging, optical coupling, true strain transfer, reliability, and fully-fledged system integration. Therefore, this dissertation is combining those three trends by coming up with thorough integration of optical sensors and the associated driving optoelectronic components through polymer embedding.

Other challenges impeding a full breakthrough within the (fiber) optical sensing field include the need for low-cost optical interrogation units, complex installation of fiber sensor modules requiring trained personnel and the tough competition with miniaturized electrical sensors typically based on Microelectromechanical Systems. A major objective of this PhD is therefore the development of a flexible or even stretchable foil in which all necessary optical sensing elements can be integrated and, if necessary, can include optical and electrical interrogation, powering and communication. This yields an optical skin that can be wrapped around, embedded in, attached and/or anchored to irregularly shaped and/or moving objects, that will allow quasi-distributed sensing.

Integrating optical sensors and their associated optoelectronic driving and read-out components enables the fabrication of photonic skins for optical sensing. This unobtrusive photonic sensing skin is a new paradigm for optical sensors integrated in an unprecedented manner with optoelectronic and electronic circuitry in flexible and stretchable skins for applications in various engineering disciplines such as structural health monitoring, automotive industry, robotics, health care etc. Furthermore, because of their robustness, optical fibers sensors are nowadays also used in the field of oil and gas extraction.

After two introductory chapters, Chapter 3 describes the embedding of optical fiber sensors in polymer host materials resulting in rigid, flexible or stretchable sensing foils. Depending on the application and the required sensitivity, both mechanically and spatially, a different embedding material is used. Ormocer from Micro resist technology is a popular fiber coating material. This material is used in this dissertation as a rigid fiber embedding - optical skin - material. The stretchable alternative is based on PDMS, a silicone type family of materials.

Traditional optical fibers are based on silica and fabricated through a drawing process starting from a preform. Sensors based on fiber Bragg gratings are typically inscribed using an interference pattern of a UV light source. Within this dissertation also special types of fibers possessing unique sensing capabilities are used. These include *polymer* fiber alternatives offering a higher degree of mechanical flexibility and compliance with biomedical applications. Furthermore, a special type of silica fiber sensors based on microstructures (typically air holes) surrounding the fiber core is embedded enabling tuning of the sensor

response to different ambient parameters. Unwanted cross-sensitivity effects related to temperature variations can be reduced to a minimum and the transverse strain/hydrostatic pressure sensitivity can significantly be enhanced.

Especially in biomedical applications there is a growing need for embedded sensors which can be embedded in human-friendly, biocompatible or even implantable systems. The different embedding techniques therefore also include a tubular version which allows to produce embedded fiber sensors in cylindrical shapes. An application which is demanding for this technology is esophageal examination monitoring pressure waves propagating in the esophagus. This sensor concept is introduced in Chapter 2 and further discussed within Chapter 3. Within this last-mentioned chapter, technology is developed to come up with a multiplexed polymer fiber sensor embedded in a cylindrical tube with a diameter of 4.5 mm. Comparing the polymer fiber sensing tubes with the traditional silica sensors, the polymer fiber sensors outperform their silica counterparts by a factor 6 in terms of sensitivity.

Similar to electronic components needing electrical powering, all optical elements need an optical powering source and/or detecting unit. Chapter 4 reports on the development of a dedicated package to integrate these necessary peripheral (opto)electronic components. To fabricate these ultra-thin packages, technology was optimized using the research experience available within the Centre for Microsystems Technology (CMST) through the PhDs of Wim Christiaens (Ultra-Thin Chip Technology), Erwin Bosman (flexible optoelectronic packaging), Jeroen Missinne (introducing stretchable transducer layers and development of conformable optical tactile sensors) and Rik Verplancke (packaging technology for stretchable microsystems). This "ultra-thin" embedding approach is applied for the first time on chips with back-contact pads in this chapter. The optoelectronic chips (lasers, light emitting diodes, photodetectors) are thinned down to a thickness of 20 μm during the embedding process consequently also removing the contact pads on the backside. Redeposition of these back-contact layers and annealing ensure proper functioning of the thinned components. From a fiber sensing point of view, also the modal structure of laser components should be closely monitored. The embedding process was therefore also extended towards single-mode components, more specifically Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSELs), offering excellent compatibility with optical sensing structures. A 40 μm thick optoelectronic package incorporating an active component, heatsinking and electrical fan-out is the result of this chapter.

Although the use of optical fiber sensing systems is growing steadily, cost effectiveness is one of the biggest challenges preventing a complete breakthrough. The cost item which is generally the most important relates to the *coupling* of fibers or waveguides to optical sources (e.g. lasers) and detectors. Often alignment accuracies down to or even below 1 μm are needed implying the need for active coupling schemes. Active coupling requires lighting up the optical structures

to monitor and maximize the coupled optical power (into a fiber, waveguide or photodetector) before fixing the coupling structures preventing high throughput fabrication processes. Great care must be consequently taken when designing, prototyping and manufacturing coupling technologies for optical systems.

Within Chapter 5 a dedicated fiber coupling technology is developed to provide a cost-effective, integrated way to launch light emitted by a laser into an optical fiber and to capture the light from an optical fiber by a photodetector. Next to the active coupling process, the main challenge here is to ensure the compatibility with the planar sensing foils and ultra-thin packaged lasers and detectors from respectively Chapters 3 and 4. As a result, a PMMA based coupling plug with integrated micromirror provided on the fiber itself provides a low-loss and optical skin compatible (coupling plug thickness of 500 μm) coupling scheme for the envisaged applications. A total loss number of 7 dB is achieved for a full single-mode optical link based on a VCSEL-photodetector system and including in- and out-coupling as well as propagation losses.

Most of the technologies developed within this PhD are generic technologies which can be used for other applications than sensing. The characterization and testing results are however performed from an optical fiber sensing point of view. A fully embedded fiber sensing system is described in Chapter 6 combining integrated lasers, detectors and fibers into a high-speed, low-cost and highly accurate fiber sensor interrogation system. This system is demonstrated using a dynamic sensor read-out with an interrogation frequency of 1 kHz while measuring 1000 data points each interrogation cycle. Because of the limited wavelength range covered by the laser components used within this chapter, multiplexing different sensing points is the main challenge associated with this approach. This can be solved using a combination of optical sources or using a special type of vertically emitting sources covering a broader tuning range.

Within Chapter 7, an alternative sensor to measure pressure or vertical displacements is presented. The sensing principle is based on optical feedback in a semiconductor laser causing interferometry effects. By using this sensing principle inherent to the laser itself the need for fibers or waveguides and associated coupling schemes is avoided. Starting from the embedded components from Chapter 4, sensing intelligence is added to vertically emitting lasers (VCSELs). These sensing features include a PDMS transducer layer to convert an externally applied pressure into a displacement and a reflecting layer recoupling the light back into the laser cavity. This vertical displacement is changing the length of the laser cavity and consequently adjusting the optoelectronic characteristics of the VCSEL. Lasers emitting at 850 nm are integrated yielding an interferometric signal with a periodicity of 425 nm. Using this sensing principle it is consequently possible to visualize displacement variations on a nanometer scale. To maintain the integration advantages, optical read-out measurements requiring additional photodetector or spectrometer components, are avoided. Reading out the sensor is

therefore done electrically providing a sensitivity of $4.71 \mu\text{V}/\text{nm}$ (displacement) or $26.2 \mu\text{V}/\text{mbar}$ (pressure). The use of laser chip *arrays* enables easy and high-density multiplexing of sensing points. The spatial range of one sensor element is $200 \mu\text{m}$ (halving the sensor response).

Chapter 8 concludes this dissertation by listing the main contributions to the different optical sensing branches. A short overview of the different proof-of-principle systems is also included as well as a look back on the initially defined objectives.