

Ontwerp en karakterisatie van
CMOS-compatibele microspiegelmatrices in SiGe-MEMS-technologie

Design and Characterization of
CMOS Compatible Micromirror Arrays in SiGe MEMS Technology

Roel Bernaert

Promotor: prof. dr. ir. H. De Smet
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 2011 - 2012



ISBN 978-90-8578-464-7
NUR 959
Wettelijk depot: D/2011/10.500/68



Universiteit Gent
Faculteit Ingenieurswetenschappen en
Architectuur
Vakgroep Elektronica en Informatiesystemen
(ELIS)

Promotor: Prof. Dr. Ir. Herbert De Smet

Universiteit Gent
Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Vakgroep Elektronica en Informatiesystemen (ELIS)
Centre for Microsystems Technology (CMST)
Technologiepark 914, B-9052 Zwijnaarde, België
Tel.: +32-9-264.53.50
Fax.: +32-9-264.53.74

Dit werk kwam tot stand in het kader van het SBO (Strategisch BasisOnderzoek)-project Gemini (Generic Electronics and Microsystems INtegration Initiative) van het IWT-Vlaanderen (Instituut voor de aanmoediging van Innovatie door Wetenschap en Technologie in Vlaanderen) in samenwerking met K.U.Leuven en imec (Interuniversity Microelectronics Centre). Het Fonds Wetenschappelijk Onderzoek (FWO) - Vlaanderen bood financiële ondersteuning tijdens de laatste maanden van dit werk.



Proefschrift tot het behalen van de graad van
Doctor in de Ingenieurswetenschappen:
Elektrotechniek
Academiejaar 2011-2012

Dankwoord

Mahatma Gandhi:

*”Bijna alles wat je doet is onbelangrijk,
maar het is erg belangrijk dat je het doet. ”*

Vier jaar onderzoek werden in eerste instantie mogelijk gemaakt door het Agentschap voor Innovatie door Wetenschap en Technologie (IWT) in het kader van het Gemini-project in samenwerking met imec, K.U.Leuven en UGent. Ook het Fonds Wetenschappelijk Onderzoek (FWO) - Vlaanderen wil ik bedanken voor de financiële ondersteuning van mijn onderzoek gedurende de laatste maanden.

Doorheen het volledige traject was er één constante, mijn promotor Herbert De Smet. Dank je, voor de bijna 7-op-7-paraatheid om me te helpen de deuren te vinden in de onontkoombare *muren van het onderzoek* en voor je groot aandeel in opgedane kennis en weetjes, wetenschappelijk als niet-wetenschappelijk. Je vormde me tot de onderzoeker en ingenieur die ik nu ben. Hiernaast wil ik ook de andere leden van de jury bedanken voor hun bereidwillige medewerking in de examencommissie.

De collega's van Gemini verdienen ook vermelding met in het bijzonder Ann Witvrouw voor de vlotte communicatie, Sukumar Rudra voor de allesomvattende gesprekken, Jeroen De Coster voor ondersteuning bij het reserveren en het gebruik van de LDV in imec en Rita Van Hoof om extra *samples* te voorzien voor de laatste metingen.

Zonder de mensen op mijn multicultureel bureau was werken waarschijnlijk een compleet ander verhaal geweest. Ze kwamen, bleven of gingen. Kristof Dhaenens, bedankt voor de huis-, tuin-, keuken-, roze caravanen ver daarbuitentips! Aykut Avci, door jou ben ik niet meer onzeker Engels te praten, mijn Europese blik op cultuur, muziek, enz. werd ruimschoots aangepast! Jelle De Smet, bedankt voor de taartjes, de *last minutes*, de display-quiz en ook dat de kerstboom op je bureau mocht blijven staan. Ik

hoop je ooit tegen te komen met je zonnelenzen in! Swarnakamal Priyabardini, ooit kom ik je familienaam te weten! Ik mag hierbij zeker ook Peter, San Lam, Hüseyin Murat, Nursen, Veerle en Dorien niet vergeten! De collega's van CMST zijn altijd bereid te helpen en ondersteuning te bieden. Een speciale dank gaat naar Dieter Cuypers voor allerhande medewerking en raad, Tomas Podprocky voor de *Comsol*-initiatie en -assistentie, Benoit Bakeroot voor de Coventor-begeleiding, Vincent De Gezelle voor de geboden oplossingen bij *Cadence*-installatieproblemen, Jodie Buyle voor de luchtige gesprekjes, Björn Vandecasteele voor het wirebonden en Jonathan Govaerts voor het transport tussen Heverlee en Zwijnaarde. Liesbeth Van Landschoot van *Photonics* wil ik bedanken voor het gebruik en bedienen van de FIB. Een extra appreciatie gaat naar Peter Janssens van Barco voor het uitlenen van een TIR-prisma.

Mijn burgievrienden hielpen me mee door de soms woelige studiemomenten: Augustijn Kindt, je bent altijd bereid even ertussenuit te knijpen en me te vergezellen zowel in het Gentse als westvlaanderense vertier. Dave, l2e5k8n. Koen, Michem, Kwallie, ook al zie ik jullie minder, het is altijd leuk jullie nog eens te zien en bij te klappen. Jean, vooral bedankt voor jouw examenadvies in het vierde burgiejaar. Morre, ik ben blij al wat opgenomen te hebben van jouw organisatorisch ondernemen.

Ellen, dank u voor je presentatietip, Griet, leuk dat we eens een elektromechanisch gesprek hadden en Lies, merci voor je structurele uniformiteitsinput!

Het was me een waar genoegen me tussendoor te ontspannen met mijn muzikale vrienden van *De Froghs*, *De Nieuwste Ontwikkeling*, *E joager vond e keun mo da keun vond van nie en co*, *No need for rehearsal*, *Fimosys* en *Ons Kramikkels*.

Ook al is het bij het haar getrokken, ik wens dat mijn bijzondere vrienden Lorenzo, Rouslan, Mike, Oerélie, Kimberley, Vanessa en Tessa het nog ver zullen schoppen!

Een enorme chapeau voor de overleesprestaties van Karton, Morre, Dave en Jelle! Ik ben nog op zoek naar een zin met minder dan 100 woorden (zonder het gebruik van liggende streepjes) die uitdrukt hoe ik dit apprecieer.

Andere vrienden (i.e. Mijn (doctoraats)vrienden van de Martelaarslaan, Breem, Dirk, Herlinde, Stefaan, Nicolas, Stef, Pieter, Werner, Lothje, Moenske, buurman, buurvrouw, Céline, Carmen, MLI en vele anderen) die me het laatste jaar minder zagen, ik popel om terug op normaal ritme met jullie te kunnen afspreken alsook de aardbol en zijn geneugten verder te

ontdekken!

Verder breng ik nog een eerbetoon aan de uitvinders van cola, B&A, The Killers, Manu Chao, Gabriel Rios, Katzenjammer en het minder mooie weer tijdens de zomer.

Last but one but not least, wil ik mijn ouders en familie bedanken voor de steun, gedurende mijn doctoraat, mijn studies, kortom mijn 28 levensjaren. Nelle en Arrie, ik heb jullie gemist!

Tenslotte wil ik Maarten bedanken voor zijn oprechte interesse in de beta-wetenschappen en zijn kookkunsten. Ook zijn kritische ingesteldheid waaide over tot in mijn onderzoek. Ik geraakte ook snel uit de panikerende momenten. Kortom, alle ingrediënten om me tot de gelukkige mens te brengen en houden die ik nu ben.

Gent, 18 augustus 2011

Roel Beernaert

Nederlandse samenvatting

In dit doctoraat wordt de haalbaarheid bestudeerd van een microspiegelmatrix die compatibel is met standaard CMOS-technologie, dit met het oog op beeldschermtoepassingen. Hiertoe heb ik nieuwe concepten en ontwerpen voor microspiegelmatrices bedacht, gesimuleerd en later ook laten vervaardigen door de collega's van imec, die tegelijkertijd een CMOS-compatibele MEMS (*micro-elektromechanische systemen*)-technologie hadden ontwikkeld gebaseerd op het materiaal SiGe. De klemtoon van mijn onderzoek lag eerder op de elektromechanische karakterisatie dan op het optische luik van de SiGe-microspiegels.

Microspiegels zijn beweeglijke minuscule spiegelstukjes die, wanneer ze in een tweedimensionale matrixstructuur zijn geordend, kunnen gebruikt worden om via projectie-optiek een willekeurig beeld te projecteren. Dergelijke microspiegel-beeldschermen zijn een goed voorbeeld van de snel aan belang winnende micro-elektromechanische systemen. Hierbij slaat 'micro' op de microscopische dimensie van deze systemen. 'Elektromechanisch' duidt op de aangelegde of verkregen elektromechanische krachten die de drijfveer vormen voor deze kleine machines. MEMS dienen elektronisch te worden aangestuurd en gecontroleerd. Tegelijkertijd moeten verschillende signalen worden verwerkt door de nabijgelegen elektronica. Om dit geheel van MEMS en elektronica te beschermen tegen omgevingsfactoren zoals watercondens, stof, luchtstroming, enz. wordt dit meestal verpakt, net zoals met zuiver elektronische chips gebeurt. Het heeft allerlei voordelen MEMS te implementeren die fungeren als sensoren of actuatoren op kleine schaal. De kleinere, lichtere en vaak goedkopere MEMS-implementaties hebben uiteenlopende toepassingen zoals bv. microfoons, druksensoren, accelerometers, gyroscopen, micromotors, diffractieroosters en microspiegels. In mijn doctoraat komen verscheidene MEMS uit de literatuur aan bod met hun uiteenlopende toepassingen. De deelverzameling van microspiegels wordt nader bekeken met als schoolvoorbeeld van een succesvol MEMS-product: het *Digital Micromirror Device* (DMD)-display, gekend van zijn implementatie bij projectiedisplays.

De complexe structuur van de DMD zorgt dat de microspiegel, bestaande uit een Al-legering, kan roteren tussen twee toestanden overeenkomstig de hoeken -12° en $+12^\circ$ [1]. Het DMD-rooster werkt als een 'spatiale lichtmodulator' (SLM) waarbij elke DMD-spiegel overeenstemt met één digitale lichtklep. De aan- en uittoestand voor elke microspiegel zorgt dat invallend licht gereflecteerd wordt, respectievelijk door de projectielens of ernaast, naar een lichtabsorbeerder [2]. Elk spiegeltje komt overeen met een pixel op het scherm, de hele matrix met het geprojecteerde beeld op het scherm. De aan- en uittoestand van de DMD-spiegel geeft respectievelijk een witte en een zwarte pixel weer. De verhouding van zwarte en witte toestanden per tijdslot bepaalt de grijswaarde voor de overeenkomstige pixel.

Wanneer een *frame*-periode is verdeeld in n gelijke *subframe*-periodes, bekomt men $n+1$ mogelijke grijsniveaus voor die pixel. Door de toepassing van binair gewogen pulsbreedtemodulatie (PWM) zijn de *subframe*-periodes opgesplitst volgens een binair gewogen verdeling (zoals bij DMD). Op die manier kunnen 2^n intensiteitsniveaus worden bereikt [3]. Om kleurbeelden te produceren bij projectiesystemen met een enkele DMD-chip wordt vaak een roterend kleurenwiel gebruikt. Een condensorlens collecteert het licht van de lichtbron en beeldt die af op het kleurenwiel. De SLM wordt via een tweede lens opeenvolgend gelijkmatig belicht met rood, groen en blauw licht. De spiegels schakelen per primair kleurframe zodat achtereenvolgens een roodbeeld, groenbeeld en blauwbeeld gevormd wordt. Wanneer deze drie kleurframes na elkaar binnen de totaalframeperiode (typisch $1/60\text{s} = 16,66\text{ms}$) plaatsvinden, neemt het oog één kleurbeeld waar. Ook al lijken de duizenden ontzettend kleine DMD-spiegeltjes fragiel, beschikken deze echter over een sterke betrouwbaarheid.

Om te begrijpen waarom SiGe-MEMS voordelige eigenschappen kunnen hebben, gaan we verder in op de werkelijke productie van MEMS. Courant toegepaste MEMS-technologieën komen aan bod zoals *bulk-micromachining* en *oppervlakte-micromachining*. Het strategisch basisonderzoeksproject Gemini¹ (*Generic Electronics and Microsystems INtegration Initiative*) dat het kader vormde voor het ontwikkelen van SiGe-spiegels, had tot doel de ontwikkeling van een generisch technologieplatform voor het creëren van SiGe-MEMS op standaard CMOS-technologie. De lage depositietemperatuur van SiGe zorgt er immers voor dat de onderliggende CMOS-lagen niet beschadigd worden. Door de logische en mechanische componenten te combineren in een enkele chip, verkrijgen

¹Het project Gemini geniet financiering in het kader van het SBO (strategisch basisonderzoek)-programma van het IWT.

we meer compacte, nauwkeurigere en betrouwbaardere MEMS. Enerzijds werd de technologie ontwikkeld, anderzijds werden twee ontwerpdelen (GEMI en GEMII) die geproduceerd werden ook gekarakteriseerd. Binnen dit project had ik de taak de haalbaarheid van zelf ontworpen SiGe-microspiegels aan te tonen. Naast deze demonstrator zijn er ook diffractie-roosters en accelerometers ontworpen en getest, dit respectievelijk door de collega's *Sukumar Rudra* (UGent) en *Lianggong Wen* (K.U.Leuven).

Verschillende SiGe-microspiegelmatrices werden ontworpen en gesimuleerd. Na ontwikkeling ervan in imec werden ze gekarakteriseerd. Om een idee te krijgen over de werkspanning ging ik voor de verschillende microspiegelmatrices op zoek naar de *pull-in*-spanning V_{PI} en *pull-out*-spanning V_{PO} . Dit is de spanning waarbij de spiegel respectievelijk inklapt op en losgelaten wordt van de landingelektrode. Voor verschillende basisspiegels met aan elke zijde een aantrekkende elektrode (zogenoemde '2x1'-microspiegels) werden V_{PI} en V_{PO} gesimuleerd en vervolgens gemeten (m.b.v. een Laser Doppler Vibrometer) op de gerealiseerde SiGe-microspiegels. De experimentele V_{PI} en V_{PO} lagen in lijn met de gesimuleerde spanningen. Het functioneren van de microspiegelmatrices toont meteen de CMOS-compatibiliteit van de technologie aan. Vervolgens ging ik op zoek naar de elektrische CMOS-compatibiliteit van de matrices.

Het onderzoek leverde ons verschillende parameters die deze V_{PI} en V_{PO} kunnen verlagen. Ten eerste zorgen grotere microspiegels (bij gelijke spiegelhoogte) voor lagere *pull-in*- en *pull-out*-spanningen. Dit heeft echter als nadeel dat de maximale spiegelhoek en resonantiefrequentie kleiner wordt. Ten tweede geven langere en smallere hengsels een verlaging van V_{PI} en V_{PO} , alweer ten koste van een kleinere resonantiefrequentie. Ten derde geeft de implementatie van een nieuwe elektrodeconfiguratie, waarbij de elektrodes een getrapte of graduele vorm hebben, een verlaging van deze spanningswaarden. Ten vierde, de aansturing van de microspiegels via analoge hoeksturing en met het gepaste projectiesysteem vormt een alternatief [4]. Verschillende grijswaarden kunnen zo ook worden verkregen. De spiegels roteren tussen kleine spiegelhoeken zonder dat ze inklappen naar de uiterste toestanden. De werkspanningen voor deze situatie worden bijgevolg onder de *pull-in*-spanning V_{PI} gehouden. De werking van de '2x1'-spiegels werd geïllustreerd met een demo-microspiegelmatrix.

Metingen op $15\mu\text{m}$ -microspiegels toonden een schakeltijd (tussen de twee uiterste toestanden) binnen de $5\mu\text{s}$, wat vergelijkbaar is met de schakeltijd van DMD-microspiegels.

De reflectiviteit van de Al-laag zoals dat van de SiGe-spiegels werd

gemeten. De Al-reflectiviteit vertoont een vlakke karakteristiek net onder 80% in het zichtbare spectrum. Dit is 8% lager in vergelijking met de reflectiviteit van DMD-spiegels (88% [5]). Ook werd in samenwerking met *Sukumar Rudra (Photonics, UGent)* een geoptimaliseerde methode ontwikkeld om de optionele tijdelijke verpakking te verwijderen. De *decaptijd* werd gereduceerd tot 40s.

Tijdens het onderzoek naar de eenvoudige '2x1'-microspiegels doken enkele ongewenste aspecten op:

- Zo zijn de V_{PI} - en V_{PO} -waarden voor de spiegels niet uniform over de hele matrix.
- Er is het fenomeen stictie dat zorgt voor een grotere spreiding op V_{PO} . Dit effect kan echter verminderd worden door het voorzien van een SAM (*Self Assembled Monolayer*)-laag (werk van *Fangzhou Ling* [6]).
- Overspraak tussen aanliggende microspiegels treedt op en wordt waarschijnlijk veroorzaakt door luchtverplaatsing. Het voorzien van een verpakking met daarbinnen een ijlere omgeving zou hiertoe een oplossing kunnen bieden. Tegelijkertijd wordt de chip zo afgeschermd van negatieve invloed van buitenaf zoals watercondens, luchtverplaatsing, stof, enz.
- Bij de meetresultaten werd telkens een lagere maximale spiegelhoek geobserveerd. Naast technologische afwijking van het ontwerp is het zogenoemde pistoneffect een boosdoener. Dit doorbuigen van de hengsels naar de elektrodes toe kan gedeeltelijk tegengegaan worden door kleinere hengsels te implementeren, wat gepaard gaat met lagere werkspanningen.

Echter, om een elektrische CMOS-compatibiliteit te bekomen, bijvoorbeeld bij werkspanningen binnen een standaard 5V-bereik, is een meer complexe microspiegelstructuur noodzakelijk. Een nieuwe microspiegel met zes onderliggende elektrodes, de zogenoemde 'PIPO' (*Pull-In Pull-Out*)-microspiegel, biedt hiertoe soelaas. CMOS-compatibele werkspanningen worden afgesplitst van de hoge spanningsgolfvormen. Deze zaagtandvormen zijn gemeenschappelijk voor alle spiegels van de matrix. Een actieve matrix in de CMOS-laag levert de analoge DC-spanningen binnen het CMOS-spanningsbereik. Slechts twee transistoren per pixel volstaan, wat een sterk voordeel is, de beperkte pixeloppervlakte in acht genomen.

Door de 'PIPO'-werking wordt inherent analoge PWM geïmplementeerd. Op die manier kunnen de grijswaarden voor elk pixel arbitrair worden gekozen. Dit werkingsprincipe werd voor een $15\mu\text{m}$ -PIPO'-spiegel zowel bewezen door simulatie als op gefabriceerde SiGe-microspiegelmatrices. De voordelen van 'PIPO'-werking zijn:

- Elektrische CMOS-compatibiliteit werd aangetoond voor het standaard CMOS-5V-spanningsbereik.
- Het contoureffect, een van de belangrijkste nadelen van DMD, kan worden verholpen door de analoge PWM-werking van 'PIPO'-microspiegels.
- Twee transistoren volstaan om de 'PIPO'-spiegel aan te sturen, wat een voordeel is gezien de geringe pixeloppervlakte.
- Als we per microspiegel een opzoektabel voorzien waar de nodige analoge spanningen kunnen worden opgeslaan, hebben we een oplossing voor de niet-uniformiteit van de SiGe-spiegelmatrix.
- Door de mogelijkheid de grijswaarden arbitrair te kiezen, kan 'de-gammaomzetting' inherent door de 'PIPO'-spiegels worden uitgevoerd. Dit reduceert *data rates*, beeldverwerkings*hardware* en geheugen in vergelijking met de standaard digitale PWM-aansturing van DMD's [7].
- Een 'PIPO'-schakeltijd van ongeveer $9\mu\text{s}$ werd bereikt. Voor een 3-kleursequentieel projectiesysteem met gewogen binaire PWM (zoals bij DMD) betekent dit een hogere resolutie dan een 8-bit-verdeling per kleur.

De 'PIPO'-spiegels werden gecontroleerd op een variërend of dynamisch pistoneffect. Een verwaarloosbare afwijking van 0.03° werd vastgesteld.

Voor deze 'PIPO'-uitvinding werd een patentaanvraag ingediend [8]. Het patent is inmiddels gepubliceerd (nog niet toegekend).

Referenties

- [1] D. Dudley, W. Duncan, and J. Slaughter. *Emerging Digital Micromirror Device (DMD) Applications*. MOEMS Display and Imaging Systems: Proceedings of the SPIE, 4985(14), 2003.

- [2] P. F. Van Kessel, L. J. Hornbeck, R. E. Meier, and M. R. Douglass. *A MEMS-Based Projection Display*. Proceedings of the IEEE, 86(8):1687–1704, 1998.
- [3] L. J. Hornbeck. *Digital Light Processing and MEMS: Timely Convergence for a Bright Future (Invited Plenary Paper)*. Proceedings of the SPIE: Micromachining and Microfabrication Process Technology, 2639:2–26, 1995.
- [4] Y.S. Jo, D.-S. Yoon, S.-W. Kim, and K.-H. Hwang. *Optical performance evaluation of thin-film micromirror array in projection display*. Optical Engineering, 41(2):409–415, 2002.
- [5] <http://www.ti.com/>. *DLP 0.17 HVGA DDR Series 210 DMD*.
- [6] L. Fangzhou, J. De Coster, R. Beernaert, W.-Y. Lin, C. J. Pierre, and I. De Wolf. *Stiction reduction in electrostatic poly-SiGe micromirrors by applying a self-assembled monolayer film*. In 21st Micromechanics and Micro systems Europe (MME2010 Workshop), pages 44–47, Enschede, Nederland, 2010.
- [7] C. E. Tew. *Analog pulse width modulation cell for digital micromechanical device*. Patent number: US 6,466,358 B2. Date of patent: 15 October 2002.
- [8] H. De Smet and Roel Beernaert. *Method for operating a micromirror device with electromechanical pulse width modulation, International application published under the Patent Cooperation Treaty (PCT), World Intellectual Property Organization. International publication number: WO 2010/122018 A1, International publication date: 28 October 2010, Priority dates: 24 April 2009 (USA), 24 September 2009 (EP)*.

English summary

–Samenvatting in het Engels–

In this work the feasibility of a micromirror array compatible with standard CMOS technology is studied, aiming at display applications. Therefore I created new concepts and designs for micromirror arrays were invented and simulated. These arrays were developed by the colleagues of imec, whom had developed a CMOS compatible MEMS (micro-electromechanical systems) technology based on the material SiGe. The emphasis of my research was the electromechanical rather than the optical characterization of SiGe micromirrors.

Micromirrors are movable miniature mirrors that, when arranged in a two dimensional array, can be used to project a random image via projection optics. These micromirror displays are a good example of the rapidly emerging micro-electromechanical systems. The word 'micro' deals with the microscopic dimension of these systems. 'Electromechanical' indicates the applied or retrieved electromechanical forces that are the core of these small machines. MEMS need to be actuated and controlled electronically. At the same time different signals are processed by the accompanied electronics. To protect the whole of MEMS and electronics against negative factors such as water condensation, air, dust, etc. they are packaged, in the same way as for pure electronical chips. To implement MEMS functioning as sensors or actuators on small scale has a lot of benefits. The smaller, lighter and often cheaper MEMS implementations have diverse applications such as microphones, pressure sensors, accelerometers, gyroscopes, micro-motors, diffraction gratings and micromirrors. In this work several MEMS from literature together with their applications are mentioned. The subset of micromirrors is further evaluated with the classical example of a successful MEMS product: the DMD (Digital Micromirror Device) display, known for its implementation in projection displays.

The complex structure of the DMD makes the micromirror, comprising Al alloy, rotate between two states according to the angles -12° en

+12° [1]. The DMD array acts as a spatial light modulator (SLM) with each DMD mirror corresponding to one digital light valve. The on and off state of each micromirror reflects incident light respectively through the projection lens or next to it [2]. Each mirror represents one pixel on the screen, the whole matrix represents the projected image on the screen. The on and off state of the DMD mirror respectively provides a white and a black pixel. The ratio of black and white states per time slot determines the gray level for that corresponding pixel.

When a frame period is divided into n equal subframe periods, one obtains $n+1$ possible gray levels for that pixel. By using binary weighted pulse width modulation (PWM), subframe periods are divided by a weighted binary distribution (as for DMD). In this way, 2^n intensity levels are reached [3]. To produce color images in projection systems with a single DMD chip often a rotating color wheel is used. A condenser lens collects the light from the light source leading it to the color wheel. The SLM is consecutively illuminated with red, green and blue light. The mirrors switch for each primary color frame so successively a red image, green image and blue image is formed. When these three color frames take place after each other within the total frame period (typically $1/60\text{s} = 16.66\text{ms}$), the eye perceives a true color image. Even though the thousands of very small DMD mirrors seem fragile, they have a strong reliability.

To understand why SiGe MEMS may have advantages, we discuss the actual production of MEMS. Commonly applied MEMS technologies are mentioned such as bulk micromachining and surface micromachining. The strategic basic research project Gemini² (Generic Electronics and Microsystems INtegration Initiative) that was the framework of developing SiGe micromirrors, aimed to develop a generic technology platform for the creation of SiGe MEMS on standard CMOS technology. The low temperature deposition of SiGe ensures that the underlying CMOS layers are not damaged. By combining the logical and mechanical components on a single chip, we obtain more compact, accurate and reliable MEMS. The technology was developed and two design parts (GEMI and GEMII) were produced and characterized. In this project I had the task to prove the feasibility of self-designed SiGe micromirrors. Besides this demonstrator, also diffraction gratings and accelerometers were respectively designed and tested by colleagues Sukumar Rudra (Ghent University) and Lianggong Wen (KULeuven).

²The project Gemini enjoys funding under the SBO (Strategic Basic Research) program of the IWT.

Several SiGe micromirror arrays were designed and simulated. After development at imec, they were characterized. To get an idea about the actuation voltages I investigated the pull-in voltage V_{PI} and pull-out voltage V_{PO} . This is the voltage at which the mirror respectively collapses and is released from the landing electrode. For several basic mirrors (called '2x1'-micromirrors) with one attracting at either side, V_{PI} and V_{PO} were simulated and then measured (using a Laser Doppler Vibrometer) on the fabricated SiGe micromirrors. The experimental V_{PI} and V_{PO} were in line with the simulated voltages. The functioning of the micromirror arrays immediately shows the CMOS compatibility of the technology. Consequently I investigated the electrical CMOS compatibility of the arrays.

This provided various parameters that decrease V_{PI} and V_{PO} . First, larger micromirrors (equal mirror gap) lead to lower pull-in and pull-out voltages. This has the disadvantage that the maximum mirror angle and resonant frequency decreases. Second, longer and narrower hinges give a reduction of V_{PI} and V_{PO} , again at the expense of a lower resonant frequency. Third, the implementation of a new electrode configuration in which the electrodes form a stepped or gradual shape, reduces the voltages. Fourth, the control of the micromirrors with analog steering angle and with the appropriate projection system is an alternative approach [4]. Different shades of gray can be obtained. The mirrors rotate between small mirror angles without pulling in. The operating voltages for this situation therefore are held below the pull-in voltage V_{PI} . The operation of the '2x1'-mirrors were illustrated with a demo micromirror array.

Measurements on $15\mu\text{m}$ -micromirrors showed a switching time (between the two extreme states) within $5\mu\text{s}$, which is comparable to the switching time of DMD micromirrors.

The reflectivity of the Al-layer same as for the SiGe mirrors was measured. The Al-reflectivity exhibits a flat characteristic just below 80% in the visible spectrum. This is 8% lower compared to the reflectivity of DMD mirrors (88% [5]). Together with *Sukumar Rudra* (Photonics, Ghent University), an optimized method to remove the optional temporary cap was developed. The decap time was reduced to 40s.

During the research on the basic '2x1' micromirrors, some undesirable aspects emerged:

- The V_{PI} and V_{PO} values for the mirror are not uniform across the array.
- There is the phenomenon stiction that provides a wider spread on

V_{PO} . This effect can be reduced by providing a SAM (Self Assembled Monolayer) layer (work of *Fangzhou Ling* [6]).

- Crosstalk between adjacent micromirrors occurs and is probably caused by air flow. Providing a cap with an environment of thinner gas could offer a solution. At the same time the chip is insulated from negative external influences.
- A lower than expected maximum mirror angle was observed. Next to the technological aberrations, there is also the so-called piston effect. This bending of the hinges towards the electrodes can be partially counteracted by narrower and shorter hinges, which is associated with lower operating voltages.

However, in order to obtain electrical CMOS compatibility, for example with actuation voltages in a standard 5V range, a more complex micromirror structure is needed. A new micromirror with six underlying electrodes, called a 'PIPO' (Pull-In Pull-Out)-micromirror, offers some solace. CMOS-compatible actuation voltages are separated from the high voltage waveforms. These saw-tooth shapes are common for the whole array. An active matrix in the CMOS layer provides the analog DC voltages within the CMOS voltage range.

The 'PIPO'-operation inherently implements analog PWM. In this way, the grayscale for each pixel can be chosen arbitrarily. This principle of operation was proved for a $15\mu\text{m}$ -PIPO-mirror both by simulation as measured on fabricated SiGe micromirror arrays. The benefits of 'PIPO' operation are:

- Electrical CMOS compatibility has been shown for the standard CMOS 5V voltage range.
- The contouring effect, one of the main disadvantages of DMD can be solved by the analog PWM operation of 'PIPO'-micromirrors.
- Two transistors per pixel suffice to control a 'PIPO'-micromirror, which is a strong advantage given the limited pixel area. Two transistors are sufficient which is an advantage given the small pixel size.
- If we provide a lookup table per micromirror and store the necessary analog voltages, we have a solution to the non-uniformity of the SiGe-mirror array.

- By the ability to arbitrarily choose the gray values, 'PIPO'-micromirrors can inherently perform 'de-gamma conversion'. This reduces data rates, imaging hardware and memory compared to the standard digital PWM control of DMD's [7].
- A 'PIPO'-switching time of approximately $9\mu\text{s}$ was achieved. For a 3-color sequential projection system with binary weighted PWM (as for DMD), this means a higher resolution than an 8-bit per color distribution.

The 'PIPO'-mirrors were monitored for a varying or dynamic piston effect. A negligible deviation of 0.03° was found.

For this 'PIPO' invention, a patent application has been filed [8].

References

- [1] D. Dudley, W. Duncan, and J. Slaughter. *Emerging Digital Micromirror Device (DMD) Applications*. MOEMS Display and Imaging Systems: Proceedings of the SPIE, 4985(14), 2003.
- [2] P. F. Van Kessel, L. J. Hornbeck, R. E. Meier, and M. R. Douglass. *A MEMS-Based Projection Display*. Proceedings of the IEEE, 86(8):1687–1704, 1998.
- [3] L. J. Hornbeck. *Digital Light Processing and MEMS: Timely Convergence for a Bright Future (Invited Plenary Paper)*. Proceedings of the SPIE: Micromachining and Microfabrication Process Technology, 2639:2–26, 1995.
- [4] Y.S. Jo, D.-S. Yoon, S.-W. Kim, and K.-H. Hwang. *Optical performance evaluation of thin-film micromirror array in projection display*. Optical Engineering, 41(2):409–415, 2002.
- [5] <http://www.ti.com/>. *DLP 0.17 HVGA DDR Series 210 DMD*.
- [6] L. Fangzhou, J. De Coster, R. Beernaert, W.-Y. Lin, C. J. Pierre, and I. De Wolf. *Stiction reduction in electrostatic poly-SiGe micromirrors by applying a self-assembled monolayer film*. In 21st Micromechanics and Micro systems Europe (MME2010 Workshop), pages 44–47, Enschede, Nederland, 2010.

- [7] C. E. Tew. *Analog pulse width modulation cell for digital micromechanical device*. Patent number: US 6,466,358 B2. Date of patent: 15 October 2002.
- [8] H. De Smet and Roel Beernaert. *Method for operating a micromirror device with electromechanical pulse width modulation*, International application published under the Patent Cooperation Treaty (PCT), World Intellectual Property Organization. International publication number: WO 2010/122018 A1, International publication date: 28 October 2010, Priority dates: 24 April 2009 (USA), 24 September 2009 (EP).

Inhoud

Dankwoord	i
Nederlandse samenvatting	i
Referenties	v
English summary	i
References	v
Lijst van publicaties	xxv
1 Lopende octrooiaanvragen	xxv
2 Publicaties van internationale tijdschriften opgenomen in Web of Science	xxv
3 Publicaties in internationale conferenties als proceeding opgenomen in Web of Science	xxvi
4 Andere publicaties in internationale conferenties als pro- ceeding	xxvi
5 Publicaties in internationale conferenties als abstract	xxvii
1 Inleiding tot MEMS en microspiegels	1
1.1 Situering en doel van het doctoraat	1
1.2 Micro-Elektromechanische Systemen	3
1.2.1 Algemeen	3
1.2.2 MEMS-sensoren	4
1.2.3 MEMS-actuatoren	9
1.3 Microspiegels	13
1.3.1 DMD-display	14
1.3.1.1 Digital Micromirror Device	14
1.3.1.2 Aansturing	15
1.3.1.3 Evolutie	18
1.3.1.4 Projectie	19
1.3.1.5 Digital Light Processing	22

1.3.1.6	Voor- en nadelen	23
1.3.2	TMA-display	23
1.3.3	Mirasol-display	25
1.3.4	Scanspiegeldisplay	27
1.3.5	Schakelspiegels	27
1.4	MEMS-markt	28
1.5	Conclusie	31
	Referenties	32
2	SiGe-technologie	37
2.1	MEMS-technologieën	37
2.1.1	Fotolithografie	38
2.1.2	Bulk-micromachining	40
2.1.3	Oppervlakte-micromachining	41
2.1.4	Overige	44
2.2	Gemini-platform	45
2.2.1	De monolithische SiGe-benadering	45
2.2.2	Dunne filmmodule	49
2.2.2.1	Microspiegels	49
2.2.2.2	Diffractieroosters	53
2.2.3	Dikke filmmodule	54
2.2.3.1	Verpakte accelerometers	54
2.3	Verwijderen tijdelijke verpakking	54
2.4	Conclusie	56
	Referenties	58
3	'2x1'-SiGe-microspiegels	63
3.1	Inleiding	63
3.2	'2x1'-microspiegel	64
3.3	Pull-in en pull-out	68
3.3.1	Inleiding	68
3.3.2	Simulatie	73
3.3.3	Experimenteel resultaat	74
3.3.4	Spiegelhoek versus actuatiespanning	75
3.3.5	Uniformiteit	77
3.3.6	Graduele elektrodes	79
3.4	Dynamiek	80
3.4.1	Frequentieantwoord	80
3.4.2	Schakelen	82
3.5	Ongewenste effecten	83

3.5.1	Pistoneffect	83
3.5.2	Stictie	87
3.5.3	Spiegelschade	87
3.5.4	Overspraak tussen spiegels	91
3.6	Reflectiviteit	92
3.7	Demo	93
3.8	Conclusie	94
	Referenties	97
4	'PIPO'-SiGe-microspiegels	99
4.1	Grijsverdeling	100
4.1.1	Gamma	100
4.1.2	Contoureffect	103
4.2	'PIPO'-microspiegel	106
4.2.1	Variabele pull-in	106
4.2.2	Uitvinding	108
4.2.3	Werkingsprincipe	111
4.3	Simulaties	113
4.3.1	Variabele pull-in en pull-out	113
4.3.2	Geoptimaliseerd aanstuurschema 1	113
4.3.3	Invloed van tegenelektrodes	115
4.3.4	Geoptimaliseerd aanstuurschema 2	117
4.3.5	Pulsbreedtemodulatie	118
4.4	Experimenteel resultaat	122
4.4.1	GEMI- en GEMII-ontwerp	122
4.4.2	Variabele pull-in en pull-out	122
4.4.3	'PIPO'-schakelen	124
4.4.4	Pulsbreedtemodulatie	129
4.5	Kenmerken	133
4.5.1	CMOS-compatibiliteit	133
4.5.2	Schakeltijd	133
4.5.3	Resolutie	133
4.5.4	Dynamisch pistoneffect	135
4.6	Conclusie	137
	Referenties	138
5	Conclusie	139
5.1	Doelstelling	139
5.2	Resultaten	139
5.3	Kritische bemerkingen	142

5.4 Suggesties verder onderzoek	142
Referenties	144

Lijst van figuren

1.1	De courant gebruikte tonometer en de <i>Sensimed Triggerfish</i> glaucomalens als praktische MEMS-implementatie.	5
1.2	Digitale MEMS-microfoons.	5
1.3	De <i>InvenSense</i> IDG-600 MEMS-gyroscoopchip [10].	6
1.4	De TPMS-MEMS-chip zoals vermeld in [11].	8
1.5	MEMS-temperatuursensor [12].	8
1.6	Schema en realisatie van de in [13] voorgestelde thermoëlektrische microgenerator.	9
1.7	De micromotor en micro-RTS-systeem [14, 15].	10
1.8	De <i>ThinkJet</i> printkop met een spuitgatdoorsnede [17].	10
1.9	SEM-foto van een spuitgat van een 1in thermisch bubblejet printkop uit [18].	11
1.10	Spectrometer zoals besproken in [21].	12
1.11	RF-MEMS-schakelaar [23].	13
1.12	Schematisch gelaagde opbouw van de DMD-microspiegel [27].	14
1.13	SEM-foto van één DMD zonder de spiegel laag [27].	15
1.14	Signaalschema voor de DMD met simulatie van de omslag- en blijftransitie [24].	16
1.15	Overzicht van de verschillende spiegeltoestanden voor zowel de omslag (links)- als blijftransitie (rechts) [24].	17
1.16	Evolutie van de DMD-microspiegel tussen 1987 en 1995 [29].	18
1.17	Schema van de recentste DMD-microspiegelstructuur besproken in [28, 30].	19
1.18	Reflectie bij twee DMD-spiegels geschakeld in de aan- en uittoestand [25].	20
1.19	Illustratie van binair gewogen PWM voor een 4-bit-grijsverdeling bij DMD-spiegels [24].	20
1.20	Typisch projectiesysteem gebaseerd op één DMD-chip [31].	21

1.21	Typisch projectiesysteem gebaseerd op drie afzonderlijke DMD-chips [31].	22
1.22	Blokdiagram van de digitale dataverwerking bij een DLP-systeem [24].	23
1.23	De TMA-microspiegel [34].	24
1.24	Overzicht van het TMA-display [34].	25
1.25	IMod-pixel samen met de werking van een rood subpixel-element ter illustratie [36].	26
1.26	Hysteresiseffect bij een blauw IMod-subpiselement [36].	27
1.27	Overzicht van het scanspiegeldisplay uit [38].	28
1.28	Overzicht van de tweedimensionale optische matrixschakelaar uit [40]	29
1.29	<i>iSuppli's</i> voorspelling voor de inkomsten van de globale MEMS-consumptie en mobiele markt vanaf 2006 (Juni 2010) [41].	29
1.30	<i>iSuppli's</i> top tien globale MEMS-consumptie voor 2009 en 2010 [41] (Maart 2011).	30
1.31	<i>iSuppli's</i> voorspelling voor de inkomsten van de MEMS-consumptie en mobiele markt vanaf 2006 [41] (April 2011).	30
2.1	Het fotolithografisch overbrengen van een patroon van eenzelfde fotomasker op negatieve en positieve fotoresist [1]. .	39
2.2	Enkele typische stappen bij MEMS- <i>bulk-micromachining</i> [2].	40
2.3	De tweedimensionale elektromagnetische scanspiegel gemaakt m.b.v. <i>bulk-micromachining</i> zoals voorgesteld in [4].	42
2.4	Enkele typische stappen van MEMS-oppervlakte- <i>micromachining</i> [2].	43
2.5	Fabricatieproces van de DMD-structuur uit [6].	43
2.6	SEM-foto van één doorgesneden DMD zoals vermeld in [7].	44
2.7	X-straling-lithografie [9].	46
2.8	Hybride benadering (links) vs. monolithische integratie van MEMS en CMOS (rechts) [11].	46
2.9	SiGe-z-asgyroscop [17].	48
2.10	De 11MegaPixel-SiGe-spiegelmatrix [18].	48
2.11	SiGe-MEMS-platform [16].	49
2.12	Microspiegel van de 11MegaPixel-SiGe-spiegelmatrix [18].	50
2.13	Schematisch overzicht van het SiGe-microspiegelproces voor de dunne filmmodule [16].	51
2.14	SEM-foto (links) en microscoopfoto (rechts) van gereali-seerde SiGe-microspiegels.	52

2.15	SEM-foto van een SiGe-microspiegeldoorsnede.	52
2.16	Gerealiseerde SiGe-diffractieroosters [16, 22].	53
2.17	Schematisch overzicht van het SiGe-GEMI-accelerometerproces [16].	55
2.18	Gerealiseerde SiGe-accelerometers.	55
2.19	Optimale <i>decap</i> methode.	56
2.20	Vergelijking goed en fout <i>decappen</i>	57
3.1	<i>Cadence</i> -ontwerp en realisatie van GEMI en GEMII.	65
3.2	Het '2x1'-microspiegelmodel.	66
3.3	'2x1'-microspiegelrealisaties voor GEMI en GEMII.	67
3.4	Vergelijking tussenruimte en elektrodehoogtes voor GEMI en GEMII. Op beide doorsnedes: spiegel (bovenaan), dunne elektrode (rechts) en dikke elektrode (links).	69
3.5	Dimensieparameters voor de '2x1'-microspiegel.	70
3.6	Theoretische torsies uitgezet ten opzichte van spiegelhoek α	71
3.7	Spiegelhoek α in functie van de actuatiespanning V tussen de spiegel en één onderliggende elektrode (schematisch).	72
3.8	Ingeklapte microspiegels van GEMI-10 μm -spiegelmatrix.	72
3.9	Laser Doppler Vibrometer (LDV)-opstelling.	75
3.10	Spiegelhoek α in functie van de actuatiespanning voor een 8 μm :2.0 μm GEMI-, 10 μm :2.5 μm GEMI- en 15 μm :2.0 μm GEMI-microspiegel.	76
3.11	Uniformiteit a.d.h.v de <i>pull-in</i> - en <i>pull-out</i> -spanning voor vijf locaties op een 8 μm :2.5 μm GEMII-spiegelmatrix. (1: linksonder, 2: rechtsonder, 3: linksboven, 4: rechtsboven, 5: midden).	77
3.12	Uniformiteit a.d.h.v de <i>pull-in</i> - en <i>pull-out</i> -spanning voor vijf locaties op een 10 μm :3 μm GEMII-spiegelmatrix. (1: linksonder, 2: rechtsonder, 3: linksboven, 4: rechtsboven, 5: midden).	78
3.13	Graduele elektrodeconfiguratie.	80
3.14	Frequentieantwoord van de 10 μm :3.0 μm GEMI-microspiegel.	81
3.15	Zoom van het symmetrisch schakelen van een 15 μm :4.0 μm GEMII-microspiegel.	83
3.16	Bovenaanzicht van een microspiegelmodel in <i>Coventor</i> met aanduiding doorsnede (witte lijn).	84
3.17	Gesimuleerde verplaatsing uit het vlak op 8 μm -microspiegels voor punten op de doorsnede.	85

3.18	Gesimuleerde verplaatsing uit het vlak op $10\mu\text{m}$ -microspiegels voor punten op de doorsnede.	85
3.19	Gesimuleerde verplaatsing uit het vlak op $15\mu\text{m}$ -microspiegels voor punten op de doorsnede.	86
3.20	Gesimuleerde verplaatsing uit het vlak op $20\mu\text{m}$ -microspiegels voor punten op de doorsnede.	86
3.21	Gedrag $20\mu\text{m}:4\mu\text{m}$ GEMI-spiegels zonder FDTS-SAM-laag [4].	88
3.22	Gedrag $20\mu\text{m}:4\mu\text{m}$ GEMI-spiegels met FDTS-SAM-laag [4].	89
3.23	Microscopfoto's van verschillende beschadigde SiGemicrospiegels.	90
3.24	Overspraak bij $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMII-' 2×1 '-microspiegel. . .	91
3.25	Gemeten Al-reflectiviteit in het zichtbare spectrum.	93
3.26	Vulfactoren voor verschillende GEMI-spiegelgroottes en hengsellengtes.	94
3.27	Microscopbeeld van de demo-matrix voor verschillende DC-aansturing.	95
4.1	Afbeelding met 16 grijswaarden volgens een lineaire perceptuele helderheidsverdeling.	100
4.2	Lineaire helderheidsverdeling voor 16 ingangswaarden [1].	101
4.3	Niet-lineaire luminantieverdeling voor 16 ingangswaarden opdat de helderheidsverdeling lineair verloopt zoals in Figuur 4.2 [1].	101
4.4	B-L-relatie voor $1/2.2$ -, $1/3$ -machtsrelatie en de DICOM-standaard [1].	102
4.5	Schematische voorstelling van de-gamma-verwerking bij DLP t.o.v. CRT.	103
4.6	Standaard binair gewogen PWM bij DMD [2].	103
4.7	Quantisatie voor lage intensiteitswaarden bij 8-bit- en 12-bit-uitgangsresolutie [2].	104
4.8	Afbeelding met intensiteitsovergang voor 4-bit-resolutie met ongewenste contouren (boven), met <i>dithering</i> (midden) en voor 8-bit-resolutie (onder).	105
4.9	Aanstuurconfiguratie met vier even hoge elektrodes.	107
4.10	Aanstuurconfiguratie met twee binnenste elektrodes hoger dan de buitenste.	107
4.11	<i>Pull-in</i> -spanning in functie van de extra elektrodespanning V_{DC}	108

4.12	Schematische voorstelling van de instelbare microspegel voorgesteld in [3].	108
4.13	Voorstelling van de nieuwe 'PIPO'-microspegel.	109
4.14	Schema van een actieve matrixcel corresponderend met één microspegel.	110
4.15	'Rechttoe-rechtaan' 'PIPO'-aanstuurschema met de elektrodespanningen V_{T1} , V_{T2} , V_{DC1} en V_{DC2} en de resulterende spiegelhoek α	112
4.16	$15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ -PIPO'-spiegelmodel in het simulatieprogramma <i>Coventor</i>	114
4.17	Gesimuleerde V_{PI} en V_{PO} in functie van de extra DC-elektrodespanning V_{DC}	114
4.18	Zaagtandspanningen V_{T1} en V_{T2} van het geoptimaliseerd aanstuurschema 1.	115
4.19	Gesimuleerde V_{PI1} en V_{PO1} in functie van de DC-tegenelektrodespanning V_{DC2} met $V_{DC1} = 15\text{V}$	116
4.20	Gesimuleerde V_{PI1} en V_{PO1} in functie van de zaagtandtegenelektrodespanning V_{T2} met V_{DC1} en $V_{DC2} = 15\text{V}$	117
4.21	Gesimuleerde V_{PI} en V_{PO} in functie van de elektrodespanning V_{DC} samen met de geoptimaliseerde spanningspunten B' en A'.	118
4.22	Zaagtandspanningen $V_{T1'}$ en $V_{T2'}$ van het geoptimaliseerd aanstuurschema 2, samen met V_{T1} en V_{T2} van het aanstuurschema 1.	119
4.23	Voorstelling van het gesimuleerd spiegeltraject voor het $[V_{DC1}, V_{DC2}]$ -koppel [15,15]. (-1: ingeklapt aan zijde 2, 0: intermediair en 1: ingeklapt aan zijde 1)	120
4.24	Gerealiseerde $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ -PIPO'-microspiegels.	123
4.25	Gesimuleerde $V_{PI.COM}$ en gemeten $V_{PI.LDV}$, $V_{PO.LDV}$ in functie van V_{DC} voor een $20\mu\text{m}:4\mu\text{m}$ GEMI-'PIPO'-microspegel.	124
4.26	Gesimuleerde $V_{PI.COM}$, $V_{PI.COV}$ en $V_{PO.COV}$ en gemeten $V_{PI.LDV}$, $V_{PO.LDV}$ in functie van V_{DC} voor een $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMI-'PIPO'-microspegel.	125
4.27	Geteste $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMI-microspegel. De 4 meetpunten zijn equidistant gepositioneerd op de aangeduide witte lijn.	126
4.28	Aangelegde zaagtandspanningen V_{T1} en V_{T2}	126

4.29	Gemeten spiegelovergangen voor verschillende V_{DC2} met $V_{DC1} = 23V$	128
4.30	<i>Duty cycle</i> in functie van V_{DC2} met $V_{DC1} = 23V$	128
4.31	Gemeten verplaatsing in de vier meetpunten voor [$V_{DC1} = 23V$; $V_{DC2} = 22.2V$] bij de overgang van zijde 2 naar zijde 1.	129
4.32	Gemeten spiegelovergangen voor verschillende V_{DC1} met $V_{DC2} = 20V$	130
4.33	<i>Duty cycle</i> in functie van V_{DC1} met $V_{DC2} = 20V$	130
4.34	Gemeten spiegelovergangen voor verschillende V_{DC2} met $V_{DC1} = 26V$	131
4.35	<i>Duty cycle</i> van 'PIPO'-overgangen in functie van V_{DC2} voor verschillende V_{DC1}	132
4.36	'PIPO'-werking bij [$V_{DC1} = 25.5V$; $V_{DC2} = 21.5V$] voor eerste halve periode en bij [$V_{DC1} = 22.1V$; $V_{DC2} = 21.6V$] voor de tweede halve periode.	132
4.37	Gemeten 'PIPO'-spiegelovergang ingezoomd op het 'PIPO'-schakelen bij [$V_{DC1} = 23V$; $V_{DC2} = 22.2V$].	134
4.38	Gemeten 'PIPO'-spiegelovergang ingezoomd op het 'PIPO'-schakelen bij [$V_{DC1} = 26.5V$; $V_{DC2} = 22.2V$].	134
4.39	Gemeten spiegelovergang voor [$V_{DC1} = 25.5V$; $V_{DC2} = 22.7V$] gedurende de eerste halve periode.	135
4.40	Spiegelhoek tijdens ingeklapte toestand aan zijde 2 bij $V_{DC2} = 22.2V$	136
5.1	Alternatieve 'zwevende' spiegel met ondersteuning in plaats van ophanging [6].	143

Lijst van tabellen

3.1	Overzicht GEMI- en GEMII-microspiegelmatrices	68
3.2	Theoretische k_α in functie van de hengsellengte h	73
3.3	Fysische eigenschappen van SiGe, SiC en Al zoals aange- wend bij de simulaties.	73
3.4	Verwachte en gemeten V_{PI} en V_{PO} voor verschillende SiGe-microspiegels. (* Meting uitgevoerd door <i>Fangzhou Ling</i> [4])	74
3.5	Maximale spiegelhoek voor de verschillende spiegelgroot- tes, i.e. de theoretische $\alpha_{max,th}$ en de op GEMI-spiegels gemeten $\alpha_{max,LDV}$).	77
3.6	Gesimuleerde V_{PI} voor '2x1'- en graduele elektrodeconfi- guratie.	79
3.7	Resonantiefrequenties voor de verschillende spiegelgroot- tes. ($f_{res,TH}$: Theoretisch, $f_{res,CV}$: <i>Coventor</i> , $f_{res,LDV}$: LDV) (*Nauwkeurigheid: 0.1MHz)	81
4.1	De spanningswaarden voor V'_{T1} en V'_{T2} voor de 11 simula- tiestappen overeenkomstig een halve 'PIPO'-periode.	119
4.2	Gesimuleerde overgangen voor verschillende [V_{DC1}, V_{DC2}]-koppels ('x-y': <i>pull-out</i> bij stap x en <i>pull-in</i> bij stap y, 'x': <i>pull-out</i> en <i>pull-in</i> bij stap x).	121
4.3	Gemeten V_{PI} en V_{PO} voor zijde 1 en 2 van de 15 μ m:3 μ mGEMI-microspiegel.	125

Lijst van afkortingen

A

a.e. Arbitraire Eenheden

B

B Perceptuele helderheid

C

CMOS *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*

CMP *Chemical-Mechanical Polish*

CRT *Cathode Ray Tube*

CVD *Chemical Vapor Deposition*

D

DC *Direct Current*

DICOM *Digital Imaging and Communications in Medicine*

DLP *Digital Light Processing*

DMD *Digital Micromirror Device*

DRIE *Deep Reactive Ion Etching*

E

EOS	<i>Electrical overstress</i> , elektrische overspanning
ESD	<i>Electrostatic discharge</i> , elektrostatische ontla- ding

F

FDTS	1H, 1H, 2H, 2H-perfluorodecyltrichlorosilaan
FIB	<i>Focusing Ion Beam</i>
FWO	Fonds Wetenschappelijk Onderzoek

G

g	Tussenruimte tussen '2x1'-microspiegel en on- derliggende elektrodes
G	Schuifmodulus
GEMI	Gemini-ontwerp I
GEMINI	<i>Generic Electronics and Microsystems INtegra- tion Initiative</i>
GEMII	Gemini-ontwerp II

H

h	Hengsellengte
HAR	<i>High Aspect Ratio</i>
HDP	<i>High Density Plasma</i>
HF	Waterstoffluoride
HH	<i>Hidden hinge</i> , verstopte hengsels

I

in	Inch
IC	<i>Integrated Circuit</i>
imec	<i>Interuniversity microelectronics centre</i>
IMod	<i>Interferometric Modulator</i>
IWT	Agentschap voor Innovatie door Wetenschap en Technologie

K

K.U.Leuven	Katholieke Universiteit Leuven
------------	--------------------------------

L

L	Luminantie
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LDV	<i>Laser Doppler Vibrometer</i>
LIGA	<i>Lithographie, Galvanoformung, Abformung</i>

M

MEMS	<i>Micro-Electromechanical Systems</i>
MOEMS	<i>Micro-Opto-Electromechanical Systems</i>

N

NEMS	<i>Nano-Electromechanical Systems</i>
------	---------------------------------------

P

PECVD	<i>Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition</i>
PIPO	<i>Pull-In Pull-Out</i>
PMMA	Polymethylmethacrylaat
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> , pulsbreedtemodulatie
PZT	Loodzirkonaat Titanaat

R

RF	<i>Radio Frequency</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>

S

SAM	<i>Self Assembled Monolayer</i>
SBO	Strategisch Basisonderzoek
sccm	<i>Standard Cubic Centimeter per Minute</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
SLM	<i>Spatial Light Modulator</i> , spatiale lichtmodulator
SRAM	<i>Static Random-Access Memory</i>

T

t	Microspiegeldikte
T_{elekt}	Elektrostatistische torsie
T_{mech}	Mechanische torsie
TI	<i>Texas Instruments</i>
TIR	<i>Total Internal Reflection</i>
TPMS	<i>Tire Pressure Monitoring System</i>
TMA	<i>Thin-film Micromirror Array</i>

U

UGent	Universiteit Gent
UV	Ultraviolet

Z

z	Microspiegelgrootte
---	---------------------

Lijst van publicaties

1 Lopende octrooiaanvragen

1. Herbert De Smet and **Roel Beernaert**. *Method for operating a micromirror device with electromechanical pulse width modulation*. International application published under the Patent Cooperation Treaty (PCT). World Intellectual Property Organization. International publication number: WO 2010/122018 A1. Priority dates: 24 April 2009 (USA), 24 September 2009 (EP). International publication date: 28 October 2010.
(Status: gepubliceerd, nog niet toegekend)

2 Publicaties van internationale tijdschriften opgenomen in Web of Science

1. **Roel Beernaert**, Aykut Avci, Jelle De Smet, Herbert De Smet, Jeroen De Coster, Simone Severi and Ann Witvrouw. *Novel analog pulse-width-modulated 15- μ m SiGe micromirrors*. JOURNAL OF THE SOCIETY FOR INFORMATION DISPLAY, 18:855-861, 2010.
2. **Roel Beernaert**, Tomas Podprocky, Jeroen De Coster, Ann Witvrouw, Luc Haspeslagh, Aykut Avci, Jelle De Smet and Herbert De Smet. *Novel micromirror design with variable pull-in voltage*. MICROELECTRONIC ENGINEERING, 87:1248-1252, 2010.
3. Hüseyin Murat, Aykut Avci, **Roel Beernaert**, Kristof Dhaenens, Herbert De Smet, Lawrence Bogaert, Youri Meuret and Hugo Thienpont. *Two LCOS full color projector with efficient LED illumination engine*. DISPLAYS, 30:155-163, 2009.

3 Publicaties in internationale conferenties als proceeding opgenomen in Web of Science

1. * **Roel Beernaert**, Aykut Avci, Jelle De Smet, Jeroen De Coster, Ann Witvrouw and Herbert De Smet. *CMOS compatible SiGe micromirrors*. INTERNATIONAL DISPLAY RESEARCH CONFERENCE, 31th, Proceedings. Society for Information Display (SID), 2011.
2. Ann Witvrouw, Rita Van Hoof, George Bryce, Bert Du Bois, Agnes Verbist, Simone Severi, Luc Haspeslagh, Haris Osman, Jeroen De Coster, Lianggong Wen, Robert Puers, **Roel Beernaert**, Herbert De Smet, Sukumar Rudra and Dries Van Thourhout. *SiGe MEMS technology : a platform technology enabling different demonstrators*. ECS TRANSACTIONS. Electrochemical Society (ECS), 33:799-812, 2010.
3. Aykut Avci, Lawrence Bogaert, **Roel Beernaert**, Jelle De Smet, Youri Meuret, Hugo Thienpont and Herbert De Smet. *Efficient disparity vector coding for multi-view 3-D displays*. PROCEEDINGS OF THE SOCIETY OF PHOTO-OPTICAL INSTRUMENTATION ENGINEERS (SPIE). SPIE, the International Society for Optical Engineering, 7526:752609-1-752609-8, 2010.
4. **Roel Beernaert**, Tomas Podprocky, Aykut Avci, Jelle De Smet and Herbert De Smet. *Micromirror with electromechanical pulse width modulation*. INTERNATIONAL DISPLAY RESEARCH CONFERENCE, 29th, Proceedings. Society for Information Display (SID), 428-431, 2009.

(*Mondelinge presentatie)

4 Andere publicaties in internationale conferenties als proceeding

1. Lieve Bogaerts, Alain Phommahaxay, Carine Gerets, Patrick Jaenen, Rita Van Hoof, Simone Severi, Myriam Van De Peer, Jeroen De Coster, **Roel Beernaert**, Sukumar Rudra, Antonio La Manna, Philippe Soussan and Ann Witvrouw. *Temporary protective packaging for optical MEMS*. IMAPS 2011, 44th International Symposium on Microelectronics. IEEE, 1-4, 2011.

2. Lieve Bogaerts, Alain Phommahaxay, Carine Gerets, Patrick Jaenen, Rita Van Hoof, Simone Severi, Jeroen De Coster, **Roel Beernaert**, Sukumar Rudra, Philippe Soussan and Ann Witvrouw. *Temporary 0-level MEMS packaging using a heat decomposable sealing ring. EUROSENSORS XXV*. 2011.
3. Aykut Avci, Jan De Cock, **Roel Beernaert**, Jelle De Smet, Lawrence Bogaert, Youri Meuret, Hugo Thienpont, Peter Lambert and Herbert De Smet. *Reduced complexity multi-view video coding scheme for 2D camera arrays*. 3DTV-conference : the true vision : capture, transmission and display of 3D video. IEEE, 1-4, 2011.
4. * **Roel Beernaert**, Jeroen De Coster, Tomas Podprocky, Ann Witvrouw, Simone Severi, Aykut Avci, Jelle De Smet and Herbert De Smet. *SiGe micromirrors for optical applications*. PROCEEDINGS OF THE SOCIETY OF PHOTO-OPTICAL INSTRUMENTATION ENGINEERS (SPIE). SPIE, the International Society for Optical Engineering, 7750:6, 2010.
5. Jelle De Smet, Aykut Avci, **Roel Beernaert**, Dieter Cuypers and Herbert De Smet. *Spherically curved guest-host display for use in a contact lens*. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL DISPLAY WORKSHOPS, 17:1585-1586, 2010.
6. Ling Fangzhou, Jeroen De Coster, **Roel Beernaert**, Wan-Yu Lin, Jean-Pierre Celis and Ingrid de Wolf. *Stiction reduction in electrostatic poly-SiGe micromirrors by applying a self-assembled monolayer film*. Proceedings of 21st Micromechanics and Micro Systems Europe Workshop, 44-47, 2010.

5 Publicaties in internationale conferenties als abstract

1. **Roel Beernaert**, Tomas Podprocky, Ann Witvrouw, Luc Haspeslagh, Aykut Avci, Jelle De Smet and Herbert De Smet. Novel micromirror design with variable pull-in voltage. International Conference on Micro- and Nano-Engineering, 35th, Abstracts, 2, 2009.

1

Inleiding tot MEMS en microspiegels

1.1 Situering en doel van het doctoraat

In dit doctoraat wordt de haalbaarheid van een microspiegelmatrix die compatibel is met standaard CMOS-technologie bestudeerd, met het oog op beeldschermtoepassingen. Hiertoe heb ik nieuwe concepten en ontwerpen voor microspiegelmatrices bedacht, gesimuleerd en later ook laten vervaardigen door de collega's van imec, die tegelijkertijd een CMOS-compatibele MEMS (*micro-elektromechanische systemen*)-technologie hadden ontwikkeld gebaseerd op het materiaal SiGe. Microspiegels zijn beweeglijke minuscule spiegelstukjes die, wanneer ze in een tweedimensionale matrixstructuur zijn geordend, kunnen gebruikt worden om via projectie-optiek een willekeurig beeld te projecteren. Dergelijke microspiegel-beeldschermen zijn een goed voorbeeld van de snel aan belang winnende MEMS. In dit eerste hoofdstuk zullen we het begrip MEMS van naderbij bekijken. We zullen aantonen dat de implementatie van verschillende sensoren of actuatoren op kleine schaal allerlei voordelen heeft. Verder zal blijken dat zoals bij elke nieuwe technologie het traject van MEMS een proces van vallen en opstaan is geweest. We zullen verscheidene MEMS uit de literatuur aan bod laten komen met hun uiteenlopende toepassingen. De deelverzameling van de microspiegels zal van naderbij worden bekeken met als schoolvoorbeeld van een succesvol MEMS-product: het *Digital Micromirror Device* (DMD)-display, gekend van zijn implementatie bij projectiedis-

plays. De technologie waarin deze Al-microspiegels is echter niet publiek beschikbaar. Daarom waren we genoodzaakt onze toevlucht te nemen tot een ander MEMS-materiaal, SiGe. Om te begrijpen waarom SiGe-MEMS voordelige eigenschappen kunnen hebben, gaan we in Hoofdstuk 2 verder in op de werkelijke productie van MEMS. Courant toegepaste MEMS-technologieën komen er aan bod. We staan daarna stil bij de voordelen van het gebruik van SiGe als structuurlaag voor MEMS. Het strategisch basisonderzoeksproject Gemini¹ (*Generic Electronics and Microsystems Integration Initiative*) vormt het kader van het onderzoek op SiGe-spiegels. Het doel van dit project is de ontwikkeling van een generisch technologieplatform voor het creëren van SiGe-MEMS op standaard CMOS-technologie. De lage depositietemperatuur van SiGe zorgt er immers voor dat de onderliggende CMOS-lagen niet beschadigd worden. Door de logische en mechanische componenten te combineren in een enkele chip, verkrijgen we meer compacte, nauwkeurigere en betrouwbaardere MEMS. Enerzijds werd de technologie ontwikkeld, anderzijds werden twee ontwerpdelen (GEMI en GEMII) die geproduceerd werden ook gekarakteriseerd. Binnen dit project had ik de taak de haalbaarheid van zelf ontworpen SiGe-microspiegels aan te tonen. Naast deze demonstrator zijn er ook diffractieroosters en accelerometers ontworpen en getest, dit respectievelijk door de collega's *Sukumar Rudra* (UGent) en *Lianggong Wen* (K.U.Leuven). De klemtoon van mijn onderzoek lag eerder op de elektromechanische karakterisatie dan op het optische luik van de SiGe-microspiegels. Initieel beschouwen we SiGe-basispiegels met aan elke zijde een aantrekkende elektrode. In Hoofdstuk 3 trachten we de haalbaarheid van SiGe-microspiegels aan te tonen aan de hand van de resultaten bekomen door metingen op deze zogenoemde '2x1'-microspiegels. We behandelen er zowel statische als dynamische metingen op gefabriceerde SiGe-microspiegels. Ook lichten we verschillende ongewenste aspecten bij deze spiegels toe, samen met enkele mogelijke oplossingen om deze gebreken aan te pakken. Naast deze technologische compatibiliteit verwachten we dat de SiGe-basispiegels niet zonder meer elektrische compatibiliteit met de onderliggende standaard CMOS zullen vertonen. In Hoofdstuk 4 wordt een nieuw spiegelconcept beschreven en onderzocht. De werking van deze vernieuwende uitvinding wordt eerst aangetoond via simulatie (i.e. eindige elementenmethode) vooraleer metingen op gefabriceerde SiGe-spiegelmatrices de zogenoemde 'PIPO' (*Pull-In Pull-Out*)-werking bevestigen. Deze 'PIPO'-microspiegels bieden een oplossing voor compatibiliteit met de CMOS-spanningen maar helpen ook tegen het contoureffect, tegen *fixed pattern noise*, en maken

¹Het project Gemini geniet financiering in het kader van het SBO (strategisch basisonderzoek)-programma van het IWT.

'de-gammaverwerking' mogelijk met slechts een zeer beperkt aantal transistoren per spiegel. De 'PIPO'-microspiegels zijn vergelijkbaar met de eerste generatie DMD-microspiegels. De hengsels maken deel uit van de spiegel laag en de spiegels zijn van een vergelijkbare grootte-orde (spiegel-zijde: 15 en 20 μm). De elektrische aansturing gebeurt daarentegen analoog in tegenstelling tot de digitale actuatie bij DMD-microspiegels.

Finaal worden in het concluderende Hoofdstuk 5 de resultaten geïnterpreteerd en worden suggesties voor verder onderzoek aangereikt.

1.2 Micro-Elektromechanische Systemen

1.2.1 Algemeen

De algemene term MEMS staat voor Micro-elektromechanische systemen. Hierbij slaat 'micro' op de microscopische dimensie van deze systemen. 'Elektromechanisch' duidt op de aangelegde of verkregen elektromechanische krachten die de drijfveer vormen voor deze kleine machines. MEMS dienen elektronisch te worden aangestuurd en gecontroleerd. Tegelijkertijd moeten verschillende signalen worden verwerkt door de nabijgelegen elektronica. Om dit geheel van MEMS en elektronica te beschermen tegen omgevingsfactoren zoals watercondens, stof, luchtstroming, enz. wordt dit meestal verpakt, net zoals met zuiver elektronische chips gebeurt. Daarentegen is in sommige gevallen contact met de buitenwereld noodzakelijk voor een correcte werking. Zo is bijvoorbeeld bij een druksensor [1] een aangepaste verpakking nodig. Het geheel van MEMS, aanstuur- en uitleeselektronica samen met de verpakking, vormt de 'MEMS-chip'. Dat die kleiner, lichter en vaak goedkoper zijn dan niet-MEMS-implementaties is een enorme troef. Zo is op het moment van dit schrijven de kleinste MEMS-chip amper 0.7 mm² groot [2]. Afhankelijk van actuatie (i.e. het aansturen) of acquisitie (i.e. uitlezen) van de MEMS, kunnen we twee categorieën onderscheiden.

De eerste groep MEMS laat een bepaalde fysische eigenschap inwerken. De op de MEMS uitgeoefende elektromechanische krachten worden vervolgens omgezet in een elektrisch signaal. Dit systeem 'meet' bijgevolg een eigenschap die erop inwerkt. Deze eerste categorie beslaat de sensoren. De tweede soort MEMS daarentegen stuurt zichzelf aan en oefent op die manier invloed op de omgeving uit. Dit zijn de actuatoren. De MEMS-sensoren en -actuatoren komen uitvoeriger aan bod in respectievelijk 1.2.2 en 1.2.3.

Vele energievormen komen aan bod, gaande van mechanisch, thermisch, elektrisch, magnetisch, optisch tot (bio)chemisch, wat leidt tot een

immens aantal MEMS-toepassingen. De deelverzameling MEMS waarbij een omzetting van of naar optische energie het geval is, noemt men MOEMS (*Micro-Opto-Electromechanical Systems*).

Sinds de jaren 1970 fabriceert men MEMS met wisselend succes [1, 3]. De technologieën gebruikt bij productie van MEMS bevatten in grote lijnen volgende stappen [1]: Dunne lagen materiaal (orde nm tot μm) worden afgezet. Dit heet depositie. Bepaalde delen van deze gedeponeerde lagen kunnen worden beschermd, andere kunnen 'blootgesteld' blijven. De manier om zo patronen te definiëren heet lithografie [1]. Bij de derde basisstap, 'het etsen', wordt het materiaal van de onbeschermden delen verwijderd. Het herhalen van verschillende combinaties van deze drie stappen leidt tot de uiteindelijke MEMS. De meest courant gebruikte materialen zijn siliciumafgeleiden, maar ook polymeren of metalen kunnen de basisstructuur van MEMS bepalen [1, 4]. Door de voortdurende vooruitgang van fotolithografie is men steeds beter in staat op een gecontroleerde manier kleinere structuurtjes te vervaardigen. Men is ondertussen al onder de $1\mu\text{m}$ -grens gedoken. Geïntegreerde en mechanische systemen met afmetingen nog kleiner dan deze grens worden *Nano-Electromechanical Systems* of NEMS genoemd. Hierbij wordt verwezen naar de nanometerschaal [5]. Merk op dat NEMS tegenwoordig nog aan veel onderzoek toe zijn.

1.2.2 MEMS-sensoren

Om het scala aan toepassingsdomeinen te illustreren, behandelen we in deze sectie kort enkele MEMS-sensoren die respectievelijk fungeren als rekstrookje, capacitieve microfoon, gyroscoop, druksensor, versnellingsensor, temperatuursensor en als microgenerator.

Als eerste wordt in Figuur 1.1(b) een medische MEMS-sensor voorgesteld. De speciale lens, de zogenoemde *Sensimed Triggerfish* [6], maakt het mogelijk om drukfluctuatie binnen het oog op te volgen. Vier kleine ingebedde MEMS-rekstrookjes controleren de kromming van het oog gedurende 24 uur. Bij een verandering van de oogkromming krimpen ze in of rekken ze uit. De verkregen elektrische weerstandsfluctuatie wordt vervolgens geïnterpreteerd om 'glaucoma' (een tot blindheid leidende ziekte) te traceren. Genezen kan niet, maar na diagnose is opvolging en behandeling mogelijk. De meest courante manier om dit te checken gebeurt tijdens periodieke bezoeken bij de oogarts met een zogenoemde 'tonometer' (zie Figuur 1.1(a)). De MEMS-implementatie geeft de patiënt het praktische voordeel dat de lens gedurende 24 uur kan gedragen worden. De bijhorende uitrusting voorziet de microchip van energie en communicatie via de lusantenne in de lens.

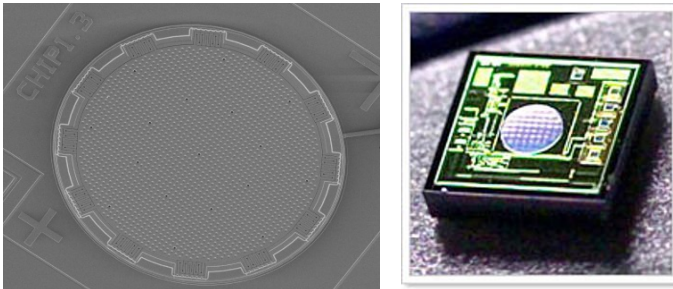


(a) Tonometer [7]

(b) Glaucomalens [6]

Figuur 1.1: De courant gebruikte tonometer en de Sensimed Triggerfish glaucomalens als praktische MEMS-implementatie.

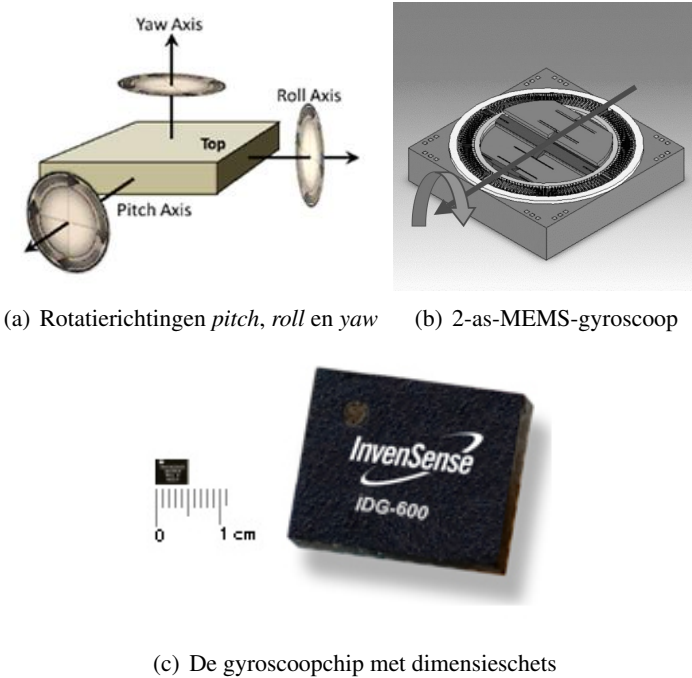
De SEM-foto (*Scanning Electron Microscope*) in Figuur 1.2(a) toont het membraan van een capacitieve MEMS-microfoon (*Analog Devices' 441 iMEMS* digitale microfoon) [8]. Een klein membraan van nog geen vierkante millimeter zet geluidsgolven van 100Hz tot 15 kHz om naar spanningen die digitaal worden verwerkt. Deze minuscule MEMS-microfoon kan worden gebruikt bij zowel mobiele toepassingen, laptops, spelconsoles als bij teleconferentiesystemen [8]. Figuur 1.2(b) toont een chip waarin een digitale microfoon is geïntegreerd [9]. De chip is beperkt in grootte en meet 3.76mm bij 4.72mm.

(a) SEM-foto van het membraan van *Analog Devices' 441 iMEMS* [8](b) *AKU2002C* chip van *Akustica* [9]

Figuur 1.2: Digitale MEMS-microfoons.

De gyroscoop is een instrument waarmee de graad van rotatie wordt bepaald. Bij vliegtuigen bepaalt dit richtinstrument de drie rotatierichtingen, de zogenoemde *pitch*, *roll* en *yaw* (zie Figuur 1.3(a)). Figuur 1.3(b) toont een voorstelling van de eerste MEMS-gyroscoop die *pitch* en *yaw* kan

vaststellen [10]. Deze ringvormige gyroscoop is geschikt voor de stabilisatie van optische systemen, maar ook voor spelconsoles zoals de *Nintendo Wii* [10]. De volledige MEMS-chip wordt getoond in Figuur 1.3(c).



Figuur 1.3: De InvenSense IDG-600 MEMS-gyroscoopchip [10].

Druksensoren zijn een voorbeeld van breed toegepaste MEMS. De applicaties zijn legio, gaande van bloeddruk meten tot het meten van banddruk. In de automobielandustrie is dat laatste een belangrijke factor bij de veiligheid maar ook bij het brandstofverbruik. Het systeem TPMS (*Tire Pressure Monitoring System*) controleert de druk in de vier autobanden. Het signaleert de bestuurder via verklikkerlichtjes wanneer de bandspanning te laag is of erger nog, als de band plat is. In elke band wordt een TPMS-chip met druksensor ingebed. Bij enkele *high-end* toepassingen is de integratie van andere sensoren noodzakelijk, zoals bij de TPMS-chip in Figuur 1.4(a) [11]. Het voordeel van deze chip is dat ze naast de MEMS-druksensor ook een temperatuursensor en een versnellingsensor in eenzelfde verpakking bevat.

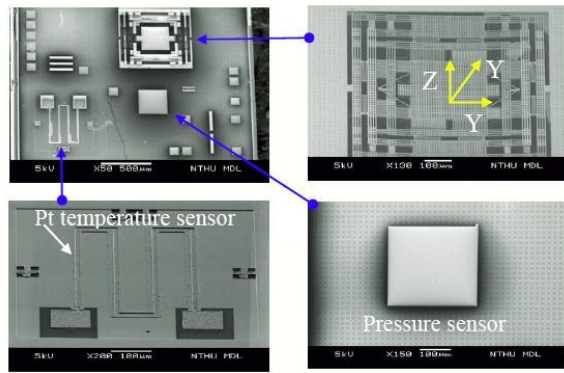
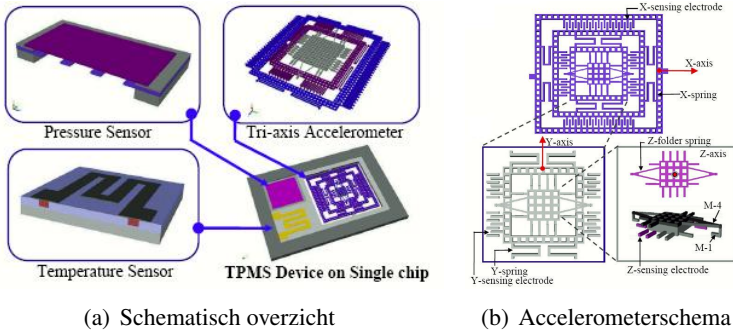
De capacitieve MEMS-druksensor van de TPMS-chip bevat een vervormbaar membraan met ingebedde elektrodes en een opgehangen structuur met stationaire elektrodes eronder. Deze elektrodes worden gevormd

uit de metaallagen uit het *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor* (CMOS)-proces. Bij verandering van druk zal het membraan vervormen en zal de capaciteit van het systeem wijzigen. Dit wordt gemeten via de elektrodes en bepaalt indirect de druk. De implementatie is te zien in Figuur 1.4(c).

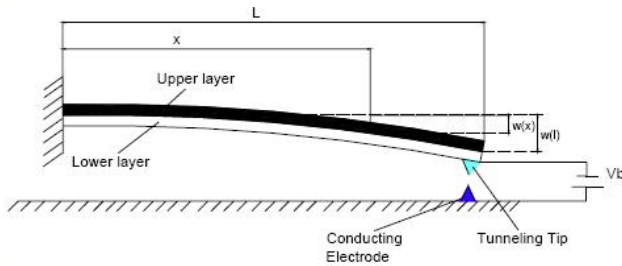
De bijhorende versnellingssensor of accelerometer meet de versnelling volgens drie orthogonale assen. Figuur 1.4(b) toont de 3-as accelerometer met een proefmassa, twee ondersteunde kaders en drie reeksen veertjes en elektrodes overeenkomstig de X-, Y- en Z-as. De veertjes zijn ontworpen zodat ze flexibel zijn in een enkele richting. Versnelling zal ervoor zorgen dat de proefmassa zal bewegen in de overeenkomstige richting. De ruimte tussen de elektrodes voor die richting zal veranderen en zo ook de capaciteit. Accelerometers vinden hun toepassing bij bijvoorbeeld *airbags*. Een botsing van een voertuig gaat gepaard met een zeer grote versnelling. Een accelerometer kan op die manier de *airbag(s)* activeren en de bestuurder beschermen tegen allerlei onheil.

De temperatuursensor bestaat uit een meanderend platinumbaantje. Temperatuurverandering zal zorgen voor een weerstandsverandering van het baantje. Op zich is dit geen MEMS-implementatie voor een temperatuursensor. Desalniettemin bestaan er MEMS-temperatuursensoren zoals in Figuur 1.5, waarbij bijvoorbeeld een bimetaal-cantilever door temperatuurverandering vervormt [12]. Deze vervorming wordt vastgesteld en geïnterpreteerd als temperatuur.

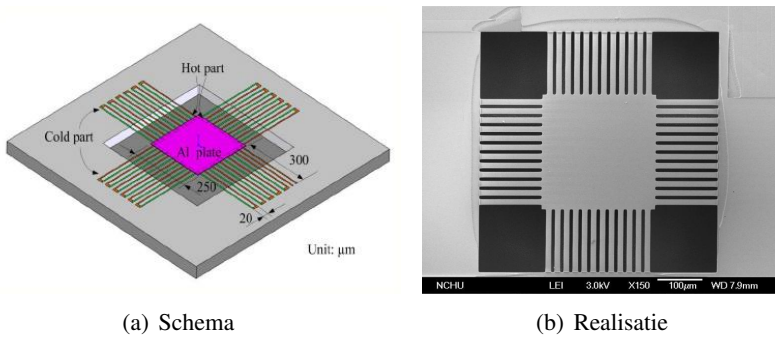
Omdat elektronica alsmaar kleiner en draagbaarder wordt, wordt de vermogensvoorziening steeds belangrijker. Zo is een microgenerator een mogelijke verbetering. De thermo-elektrische MEMS-microgenerator voorgesteld in [13] bestaat uit 24 thermokoppels in serie die samen een aluminiumplaatje vasthouden (zie Figuur 1.6(a)). Die bestaan uit twee verschillende materialen (n-type en p-type polysilicium) en maken het mogelijk warmte om te zetten in spanning aan de uitgang. Op die manier kunnen we spreken van een MEMS-sensor. In het geval dat het uitgangsvermogen wordt gebruikt om extra vermogen te leveren, spreken we van een microgenerator. Met andere woorden, thermische energie wordt omgezet naar elektrische energie ter recyclage. Om het leveren van vermogen te bevorderen zijn de thermokoppels aan de 'koude' kant ingebed in een siliciumoxidelaag en zo beter geïsoleerd. Het aluminiumplaatje en dus aan de 'warme' kant van de thermokoppels, is volledig vrij opgehangen om maximale warmte te ontvangen. De realisatie van de microgenerator is afgebeeld in Figuur 1.6(b). Voor een temperatuurverschil van 1K wordt een uitgangsspanning van $67\mu\text{V}$ verkregen.



Figuur 1.4: De TPMS-MEMS-chip zoals vermeld in [11].



Figuur 1.5: MEMS-temperatuursensor [12].



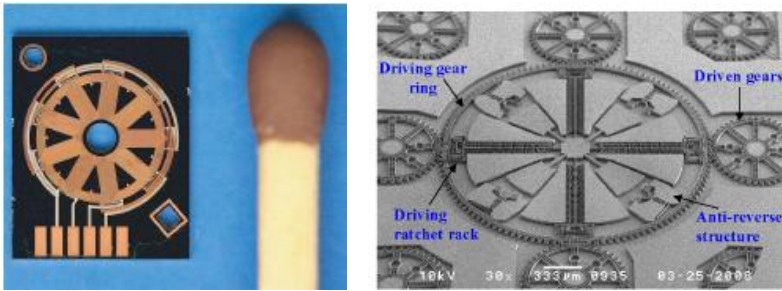
Figuur 1.6: Schema en realisatie van de in [13] voorgestelde thermoëlektrische microgenerator.

1.2.3 MEMS-actuatoren

In dit deel illustreren we enkele uiteenlopende applicaties van MEMS-actuatoren zoals de micromotor, de *Thinkjet*-printkop, het diffractierooster en RF-MEMS. Figuur 1.7(a) illustreert hoe een kleine motor of micromotor kan worden verwezenlijkt met behulp van MEMS-technologie [14]. De rotor van deze hybride MEMS-micromotor is een permanente 12-polige axiale magneet gemaakt volgens de 'macroscopische' regels en is dus *strictu sensu* geen MEMS-gedeelte. Daarom wordt er gewag gemaakt van een 'hybride' MEMS-micromotor. De buitendiameter is 4mm. Het systeem werkt als een 3-fase borstelloze DC-motor. 9 spoelen zijn per drie en per fase in serie geschakeld en zijn opgebouwd uit twee op elkaar gestapelde koperlagen met isolator tussen. De uiteindelijke rotatiesnelheid van de motor bedraagt 300 rotaties per minuut. De verwezenlijking van de micromotor heeft als doel de implementatie bij horloges.

Vaak baseren MEMS-actuatoren zich op de fysische eigenschap van elektrostatische aantrekking. Een spanningsverschil tussen twee MEMS-onderdelen brengt aantrekking teweeg. Door een intelligent ontwerp kunnen de onderdelen op een gecontroleerde manier bewegen zoals bij de micromotor met aandrijvend tandwielsysteem van Figuur 1.7(b) [15]. Vier rotatievormende 'kam-actuatoren' drijven de rotor aan in de rotatierichting. Door een gesofisticeerd palmechanisme wordt uiteindelijk een frequentie van 40Hz bereikt. Zo'n precisie-microtransmissiesysteem heeft zijn toepassing in zowel micromotors, microhorloges, optische *encoders*, meetinstrumenten als robotica.

Een van de eerste MEMS-realisaties is de *ThinkJet*-printkop van *Hewlett Packard* uit 1985 (zie Figuur 1.8(a)) [16, 17]. De printkop be-

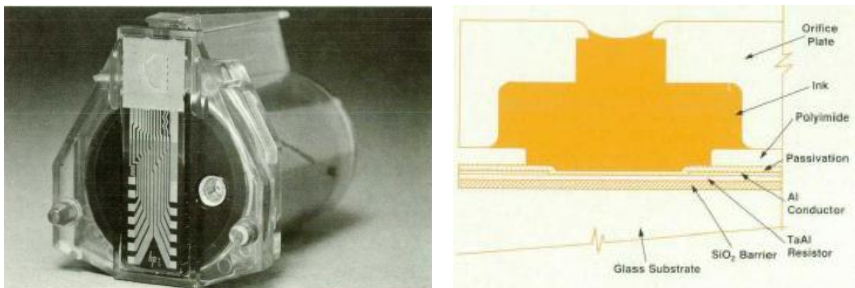


(a) Micromotor [14]

(b) SEM-foto van het MEMS-tandwielsysteem [15]

Figuur 1.7: De micromotor en micro-RTS-systeem [14, 15].

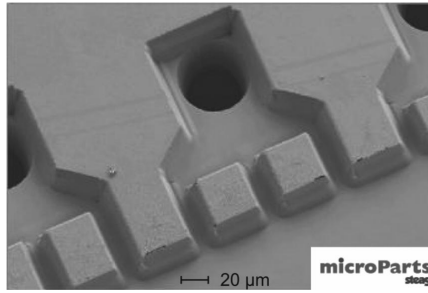
vat verschillende kanaaltjes met elk een verwarmingsweerstandje (zie Figuur 1.8(b)). Door het aanleggen van een elektrische puls op dit weerstandje ontstaat er door de vrijgekomen warmte intern een inkt dampbel in het kanaaltje. Daardoor zet het volume van de inkt uit. Na de puls en dus het induceren van warmte in het kanaaltje, implodeert de dampdruppel en induceert de ejectie van een inkt druppel. Het kanaaltje werkt dus als een soort spuitgat. De *inkjetprinter* is geboren. Anno 2011 werken veel printers nog volgens dit 'thermisch inktjet'-mechanisme. De hoge kleurkwaliteit, lage prijs en het stiller afdrucken vormen de voordelen [18]. Het inktvolume, de afdruksnelheid en -resolutie zijn bovendien fel geoptimaliseerd door de jaren heen. Een recente printkop voorgesteld in [18] maakt gebruik van een driedimensionaal polyimide gaatjesplaat (zie Figuur 1.9) die werkt volgens hetzelfde principe.



(a) ThinkJet printkop [17]

(b) Doorsnede van een spuitgat bij de ThinkJet printkop [17]

Figuur 1.8: De ThinkJet printkop met een spuitgatdoorsnede [17].



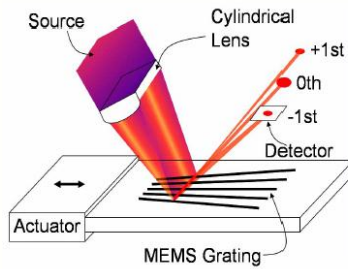
Figuur 1.9: SEM-foto van een spuitgat van een 1in thermisch bubblejet printkop uit [18].

Een diffractierooster of tralie buigt invallend licht af naargelang de golflengte en beeldt zo het spectrum af. Het werkt dus als een prisma. Een tralie bestaat uit een reeks van parallelle balkjes of *beams* die elektrostatisch aangetrokken worden door elektrodes eronder zodat ze doorbuigen. Bij een afwisseling van niet-geactueerde en geactueerde beams met een doorbuiging van $\lambda/4$ treedt maximale diffractie op naar de eerste orde (zie Figuur 1.10(a)) [19]. Hierbij staat λ voor de golflengte in kwestie. Een diffractierooster wordt meestal gebruikt als men licht met een enkele golflengte wil selecteren uit aangeboden licht (monochromatoren) [20], maar ook bij de analyse van het spectrum van licht zoals bij de spectrometer in Figuur 1.10(b) [21]). Het diffractierooster uit Figuur 1.10 bevat 101 *beams* waarvan de breedte (10 tot $34\mu\text{m}$) en onderlinge afstand (36 tot $84\mu\text{m}$) lineair wordt vergroot. Vergelijking 1.1 toont de afhankelijkheid van de eerste orde diffractiehoek φ met golflengte λ en de roosterperiode Λ .

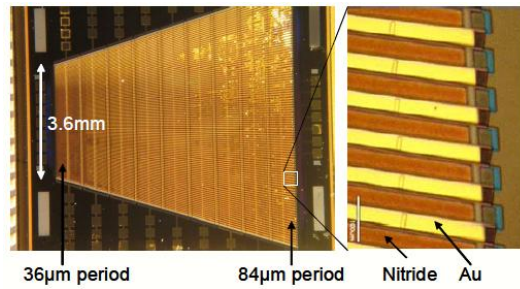
$$\sin(\varphi) = \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (1.1)$$

Door het rooster te verschuiven kunnen verschillende golflengtes worden geselecteerd door een vast opgestelde detector. Dit diffractierooster heeft bijvoorbeeld als doel het detecteren van aanwezige moleculen in het zichtbare en dicht-infrarode gebied. Een resolutie van 17 tot 70nm wordt bereikt.

RF-MEMS omvatten de MEMS-componenten die zich gedragen als elektronische componenten en functioneren binnen de RF-band [22]. Als voorbeeld tonen we de RF-MEMS-schakelaar uit [23] die zijn toepassing vindt in herconfigureerbare elektronische netwerken. De 'metaal-op-metaal' schakelaar bestaat uit een gouden metalen brug die een golfgeleidende transmissielijn overspant (zie Figuur 1.11(a)). In neutrale toestand hangt die $3\mu\text{m}$ boven de signaalgeleider. De meanderende *beams* die de



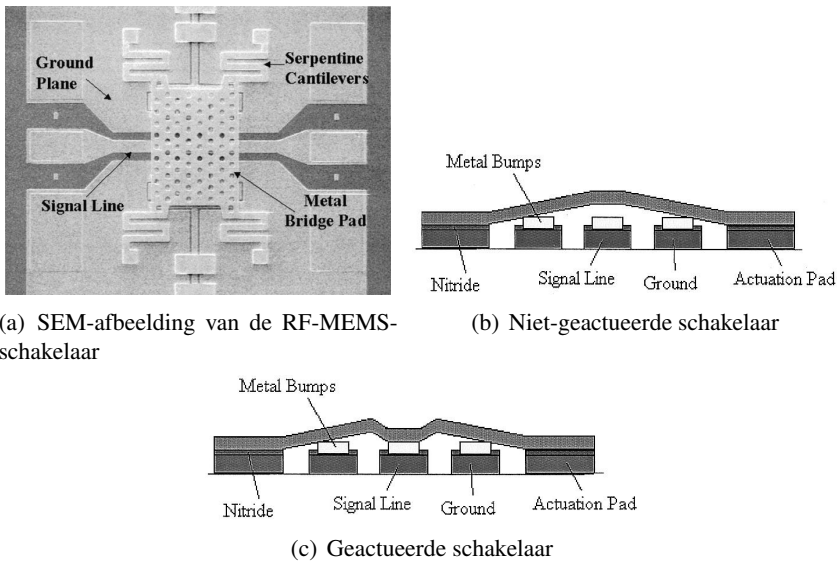
(a) Spectrometerschema



(b) Spectrometer met uitvergroting van het diffractie-rooster

Figuur 1.10: Spectrometer zoals besproken in [21].

brug ondersteunen, gedragen zich elastisch en bij het noodzakelijke spanningsverschil tussen de brug en de elektrodes eronder, kan de brug inklappen op de signaalgeleider, vandaar de benaming metaal-op-metaal. In neutrale toestand draagt de MEMS-schakelaar zich als een condensator parallel met de transmissielijn (zie Figuur 1.11(b)). Bij de ingeklapte toestand wordt de signaalgeleider verbonden met de grond (zie Figuur 1.11(c)). Deze schakelaar is een goedkope oplossing voor de integratie bij hoge snelheids-elektronica. Ze heeft een schakeltijd onder de $22\mu\text{s}$ en een inklapspanning van 15V.



Figuur 1.11: RF-MEMS-schakelaar [23].

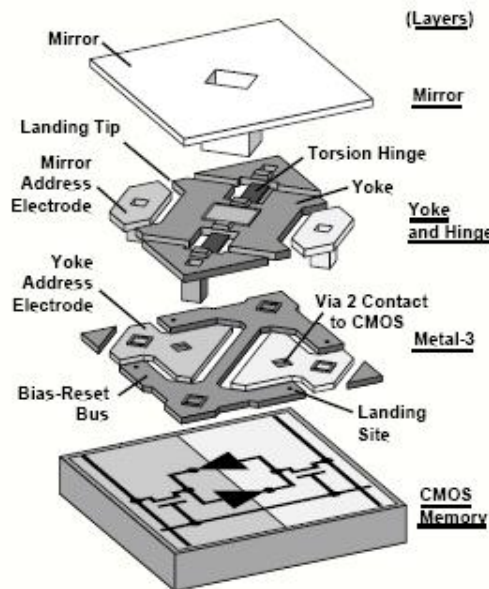
1.3 Microspiegels

De microspiegels zijn een belangrijk onderdeel van de MEMS-actuatoren. Omwille van het belang ervan in ons onderzoek worden ze apart behandeld in deze sectie. We bespreken displays opgebouwd door *Digital Micromirror Device* (DMD)-, TMA-, *Mirasol*- en scanspiegels. Als laatste beschouwen we kort de schakelspiegels.

1.3.1 DMD-display

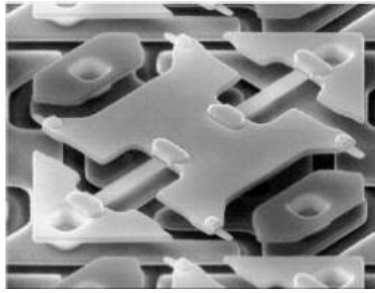
1.3.1.1 Digital Micromirror Device

De meest succesvolle MEMS-toepassing van projectiedisplays is de *Digital Micromirror Device* (DMD)-microspiegelmatrix van *Texas Instruments* (TI) die is uitgevonden door *Larry Hornbeck* in 1987 [24]. De complexe structuur van de DMD zorgt dat de microspiegel kan roteren tussen twee toestanden overeenkomstig de hoeken -12° en $+12^\circ$ [25] en functioneert als een lichtklep. Het DMD-rooster fungeert als een 'spatiale lichtmodulator' (SLM). Recent ligt de onderlinge centrum-tot-centrumafstand van de spiegels of *pitch* onder de $7.6\mu\text{m}$ [26]. Figuur 1.12 toont de meest gedocumenteerde gelaagde opbouw van de DMD-spiegel in de literatuur [24].



Figuur 1.12: Schematisch gelaagde opbouw van de DMD-microspiegel [27].

De MEMS-structuur is gebouwd op een CMOS-SRAM (*Static Random-Access Memory*)-geheugencel die de spiegel tot de aan- of uittoestand kan bewegen via de elektrodes erboven. Het gegenereerde elektrostatische veld doet het 'juk' (*yoke*) dat is opgehangen via 'hengsels' (*hinges*) roteren door torsie in die hengsels. Op dit actieve juk is de microspiegel gepositioneerd, dat enerzijds de rotatie van het juk meevolgt en anderzijds ook door de hoger geplaatste spiegelelektrodes kan worden aangetrokken. De hengsels zijn bijgevolg niet zichtbaar boven de spiegel laag. Men spreekt



Figuur 1.13: SEM-foto van één DMD zonder de spiegellaag [27].

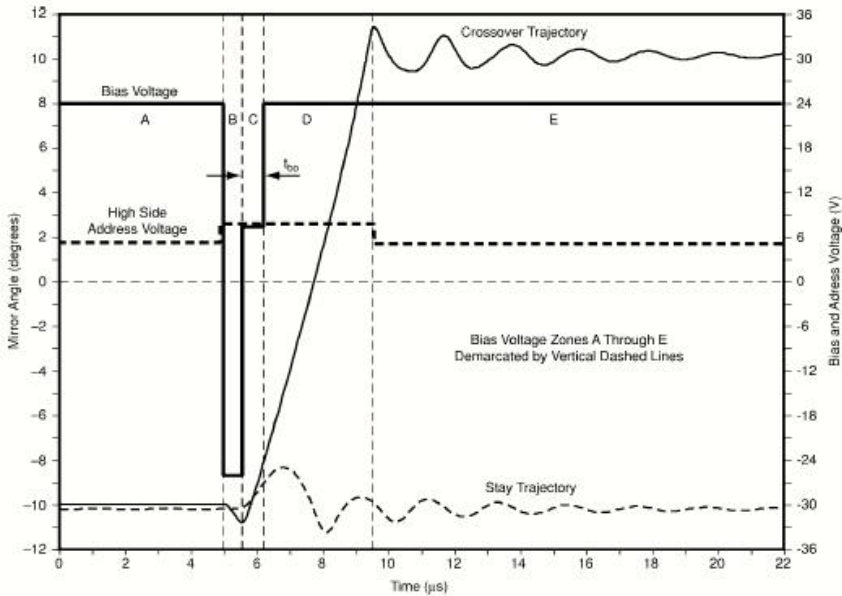
van verstopte hengsels of een *hidden hinge* microspiegel. Figuur 1.13 toont een SEM-afbeelding van een enkele DMD-structuur tot en met de laag van het juk en de hengsels. Het is duidelijk te merken dat aan de uiteinden van het juk vier kleine veertjes uitsteken. Die bieden enkele voordelen bij de dynamica van de DMD, uitgelegd in volgende sectie.

1.3.1.2 Aansturing

De complexe aansturing van de DMD is weergegeven in Figuur 1.14. De figuur wordt ingedeeld in 5 zones, A tot en met E, en geeft zowel een omslagtransitie als een blijftransitie weer, afhankelijk van de inkomende videodata. Elke periode krijgt de spiegel eenzelfde bipolair biasspanningsverloop (*Bias voltage*) gaande van 24V in A, over -26V in B, 7.5V in C en tot 24V in D en E. De elektrode aan de kant van de spiegel waar die dient aangetrokken te worden of te blijven, krijgt de vermelde *high side address*-spanning van 5V die in de zones B, C en D wordt verhoogd tot 7.5V. De andere elektrode krijgt 0V gedurende de hele periode. Figuur 1.15 geeft per zone de toestand van de spiegel weer voor deze twee overgangen [24].

Zone A fungeert als instelperiode vóór de dynamische excitatie. Hierbij is het verschil tussen de biasspanning van de spiegel en de elektrode aan de ingeklapte kant hoog genoeg om de spiegel ingeklapt te houden. Dit spanningsverschil bedraagt 19V voor de omslagtransitie en een hogere 24V voor de blijftransitie. Dat laatste zorgt ervoor dat de veertjes iets meer worden ingedrukt en dat verklaart een iets grotere spiegelhoek dan bij de omslagtransitie (zie Figuur 1.14).

De bipolaire resetpuls van de biasspanning in zone B, samen met een verhoogde *high side address*-spanning 7.5V, maakt het verschil tussen omslag- en blijftransitie cruciaal. Aan de ingeklapte spiegelzijde wordt een spanningsverschil verkregen van 33.5V voor de omslagtransitie, terwijl de blijftransitie een kleinere spanning van 26V ervaart. Zo wordt extra elas-



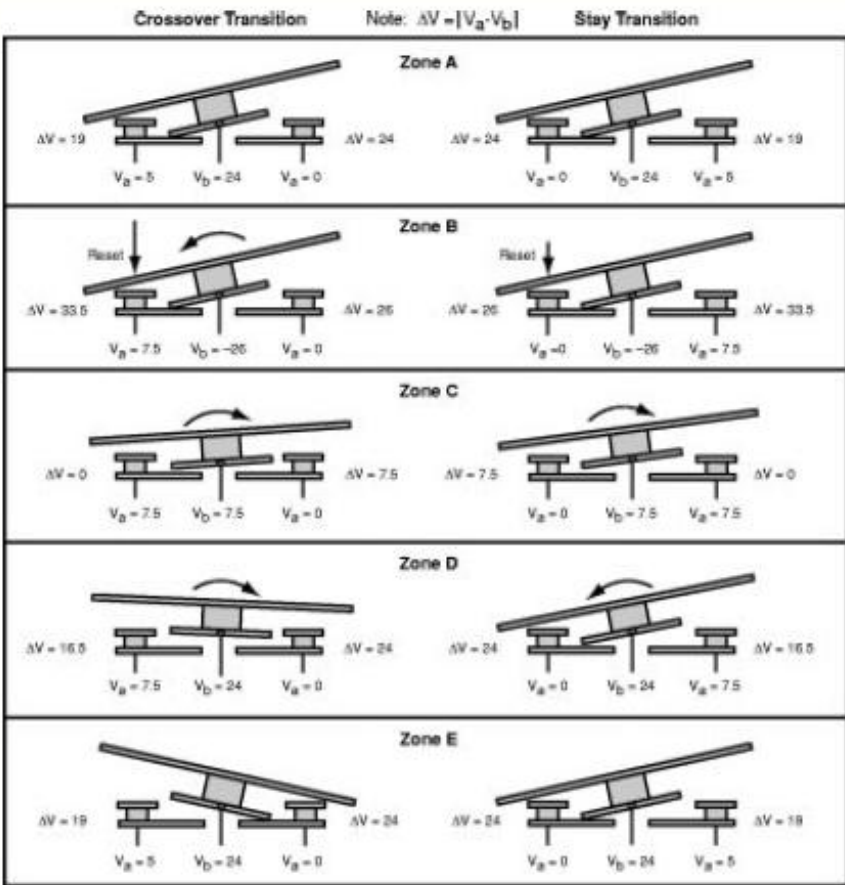
Figuur 1.14: Signaalschema voor de DMD met simulatie van de omslag- en blijftransitie [24].

tische rek-energie in de veertjes en hengsels opgeslaan als voorbereiding voor het loslaten van de spiegel in zone C.

Zone C zorgt er op een efficiënte manier voor dat de in de veertjes opgeslagen energie omgezet wordt in kinetische energie om de spiegel te roteren naar de andere zijde bij omslagtransitie, maar tegelijkertijd de spiegel nog steeds aan dezelfde kant te houden in geval van blijftransitie. Voor de omslagtransitie wordt het spanningsverschil aan de ingeklapte zijde 0V en valt de elektrostatische torsie dus weg zodat de potentiële energie in de veertjes direct wordt omgezet in kinetische energie en zo zorgt voor een snel loslaten van de spiegel. Voor de blijftransitie is het overeenkomstige spanningsverschil niet nul, maar 7.5V. Bij de overgang van B naar C worden de veertjes en de hengsels een beetje ontlast door een belangrijke terugval van elektrostatische torsie, waardoor de spiegel eventjes loskomt van de grond.

Bij de volgende zone D wordt het spanningsverschil aan de gewenste kant opgevoerd tot 24V zodat de spiegel bij de blijftransitie terugkeert naar de vorige ingeklapte toestand en bij de omslagtransitie de spiegel kan overslaan naar de andere kant zoals gewenst.

De laatste zone, zone E, laat de dynamische transiënten uitdijen om uiteindelijk de spiegel voor te bereiden op de volgende gewenste transitie,

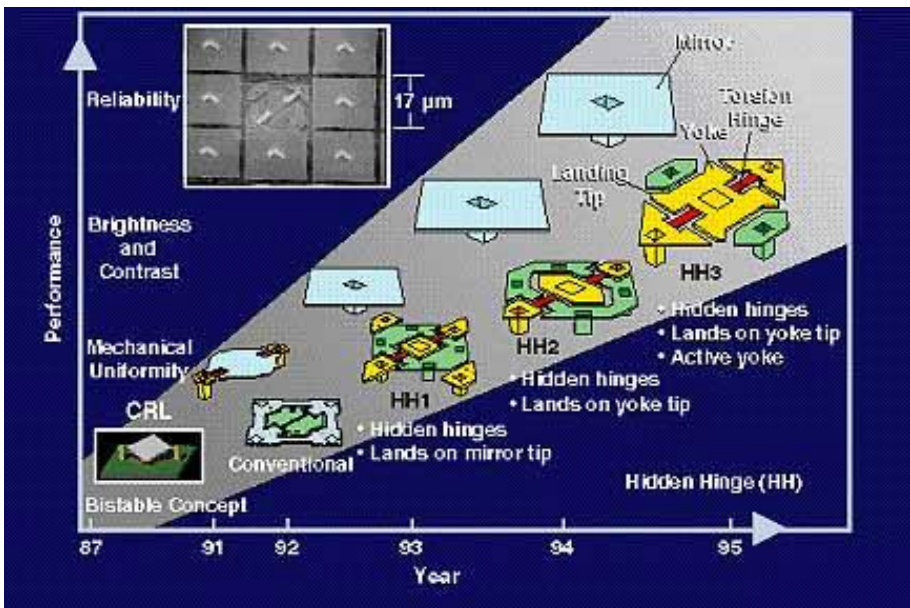


Figuur 1.15: Overzicht van de verschillende spiegeltoestanden voor zowel de omslag (links)- als blijtransitie (rechts) [24].

afhankelijk van de nieuwe inkomende videodata. De totale dynamische transitie vergt tot $5\mu\text{s}$ om de spiegel stabiel in de gewenste kanteltoestand te krijgen [28].

1.3.1.3 Evolutie

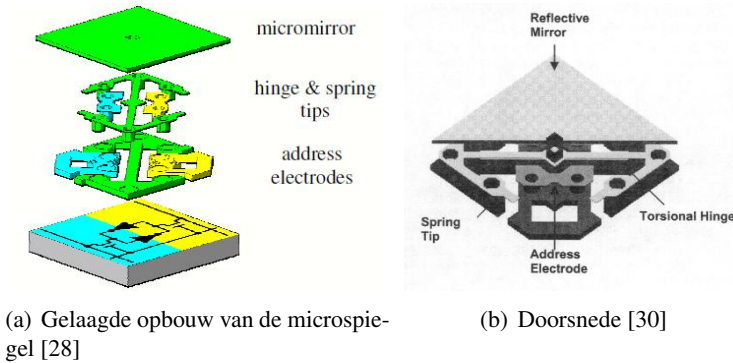
De MEMS-structuur van de DMD is voortdurend in evolutie. Vanaf de introductie in 1987 tot nu werd de opbouw steeds gesofisticeerder [28–30]. Wat ooit een eenvoudig bistabiel spiegelconcept was, werd begin de jaren 90 geoptimaliseerd tot een model waarbij de hengsels en een juk verstopt zitten onder de spiegel (*hidden hinge*). Bij deze 'HH1'-DMD landt de spiegel op twee tegenoverliggende uiteinden. Bij de nieuwere 'HH2'-DMD neemt het juk de landing voor zijn rekening. In 1995 kwam de 'HH3'-DMD waarbij niet enkel de spiegel elektrostatich wordt aangetrokken maar ook het juk, een zogenoemd 'actief juk' (*active yoke*). Een volgende stap is het aanbrengen van de extra veertjes op het juk voor een snellere dynamiek (zie Figuur 1.12 en 1.13) [24].



Figuur 1.16: Evolutie van de DMD-microspiegel tussen 1987 en 1995 [29].

Vanaf 2002 veranderde de maximale spiegelhoek van 10° naar 12° [25, 30]. De meest recente DMD-structuur vermeld in de literatuur (in 2005) [28, 30] wordt afgebeeld in Figuur 1.17. Het juk is bijna volledig

gereduceerd tot één langwerpige hengsel waarop de spiegel steunt. De elektrostatische aantrekking wordt opnieuw uitgeoefend op de spiegel én de spiegel landt hierbij op vast aangebrachte veertjes. De oorspronkelijke spiegelpitch van $17\mu\text{m}$ zou uiteindelijk onder de $8\mu\text{m}$ duiken [26].

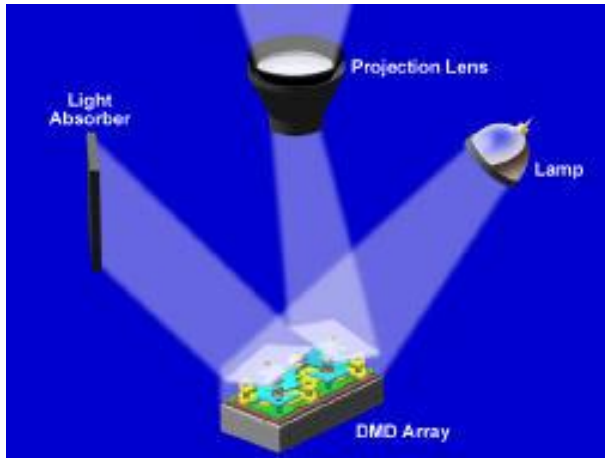


Figuur 1.17: Schema van de recentste DMD-microspiegelstructuur besproken in [28, 30].

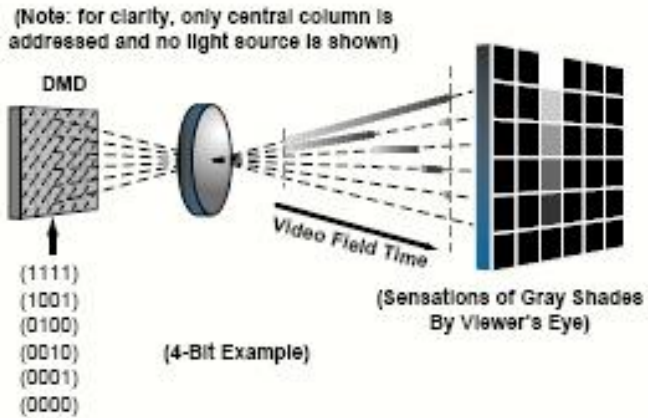
1.3.1.4 Projectie

Het DMD-rooster werkt als een SLM waarbij elke DMD-spiegel overeenkomt met één digitale lichtklep. De aan- en uittoestand voor elke microspiegel zorgt dat invallend licht gereflecteerd wordt, respectievelijk door de projectielens of ernaast, naar een lichtabsorberder [24]. Figuur 1.18 geeft de reflectie voor twee DMD-spiegels weer, geschakeld in de aan- en uittoestand. Elk spiegelkje stemt overeen met een pixel op het scherm. De aan- en uittoestand geeft respectievelijk een witte en een zwarte pixel weer. De hele matrix komt overeen met het geprojecteerde beeld op het scherm. De verhouding van zwarte en witte toestanden per tijdslot bepaalt de grijswaarde voor de overeenkomstige pixel. Wanneer een *frame*-periode is verdeeld in n gelijke *subframe*-periodes, bekomt men $n+1$ mogelijke grijsniveaus voor die pixel. Door de toepassing van binair gewogen pulsbreedtemodulatie (PWM) zijn de n *subframe*-periodes opgesplitst volgens een binaire verdeling. Op die manier kunnen 2^n intensiteitsniveaus worden bereikt [29]. Voor een 4-bit-verdeling met dus $2^4 = 16$ grijsniveaus wordt dit geïllustreerd in Figuur 1.19 voor enkele spiegels uit één kolom uit het DMD-rooster.

Om kleurbeelden te produceren bij projectiesystemen met een enkele DMD-chip wordt vaak een roterend kleurenwiel gebruikt zoals in Fi-



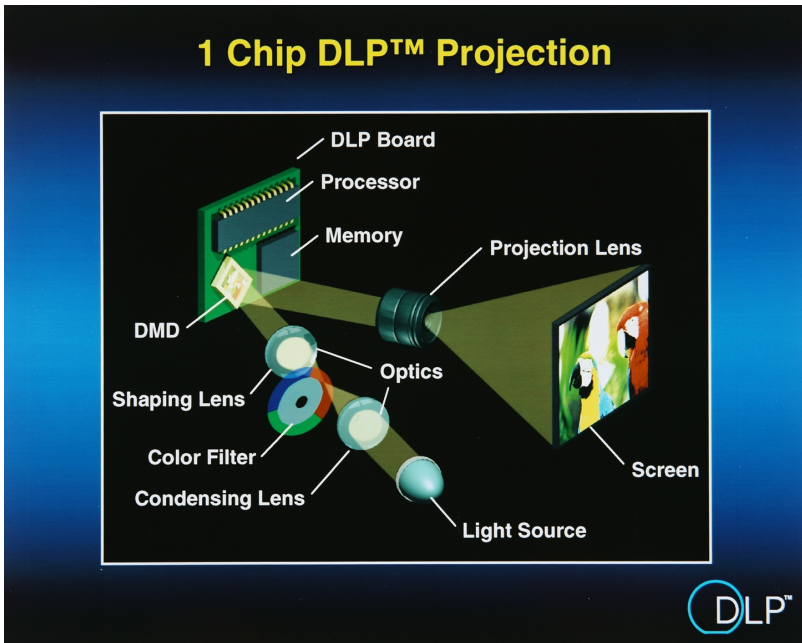
Figuur 1.18: Reflectie bij twee DMD-spiegels geschakeld in de aan- en uittoestand [25].



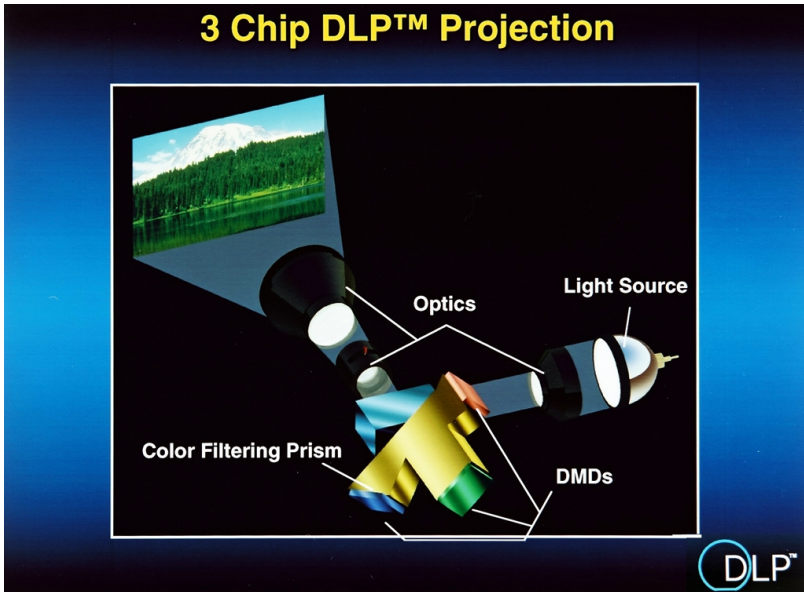
Figuur 1.19: Illustratie van binair gewogen PWM voor een 4-bit-grijsverdeling bij DMD-spiegels [24].

guur 1.20 [31]. Een condensorlens collecteert het licht van de lichtbron en beeldt die af op het kleurenwiel. De SLM wordt via een tweede lens opeenvolgend gelijkmatig belicht met rood, groen en blauw licht. De spiegels schakelen per primair kleurframe zodat achtereenvolgens een roodbeeld, groenbeeld en blauwbeeld gevormd wordt. Wanneer deze drie kleurframes na elkaar binnen de totaalframe-periode (typisch $1/60\text{s} = 16,67\text{ms}$) plaatsvinden, neemt het oog één kleurbeeld waar.

Projectiesystemen met twee of drie DMD-chips zijn ook courant. Figuur 1.21 toont hoe dit kan met een kleurgefilterd prisma waarop drie DMD's worden bevestigd overeenkomend met het rood-, groen- en blauwbeeld [31]. De aparte beelden worden met behulp van een TIR (*Total Internal Reflection*)-prisma simultaan geprojecteerd op het scherm. Op die manier kan per kleurbeeld een hogere resolutie worden bereikt en zo ook voor het totale kleurbeeld. De frame-periode hoeft hier niet opgesplitst te worden in drie kleurframe-periodes, maar in feite valt die samen met de kleurframe-periode.



Figuur 1.20: Typisch projectiesysteem gebaseerd op één DMD-chip [31].

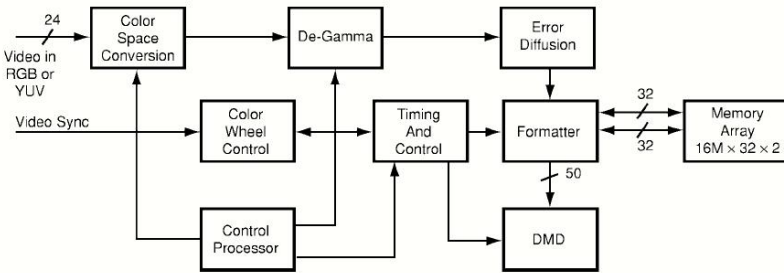


Figuur 1.21: Typisch projectiesysteem gebaseerd op drie afzonderlijke DMD-chips [31].

1.3.1.5 Digital Light Processing

De DMD-microchip vormt het hart van het *Digital Light Processing* (DLP)-systeem. Die bevat de noodzakelijke functies om de digitale media te interpreteren en ze onder een perfecte weergave te projecteren. Het DLP-systeem zorgt onder meer voor beeldverwerking, geheugen, herformatting van data, tijdscontrole, lichtbron en projectroptica [29].

De beeldverwerking bij het DLP-systeem [24] wordt geïllustreerd aan de hand van het blokdiagram in Figuur 1.22. De projector ontvangt 24 bits van parallelle digitale video data, met daarbij 8 bits voor elke kleur. Ook een pixelklok en verschillende tijdscontrolesignalen komen binnen. De data ondergaan verschillende voorverwerkingsstappen zoals 'kleurruimte-' en 'de-gammaconversie'. Na een herformatting wordt de data opgeslaan in de geheugenbuffer, waar het uiteindelijk zal worden getransfereerd naar de DMD-chip. De functie van 'de-gammaconversie' wordt nader toegelicht in Sectie 4.1.



Figuur 1.22: Blokdiagram van de digitale dataverwerking bij een DLP-systeem [24].

1.3.1.6 Voor- en nadelen

De uiteenlopende toepassingen van deze DLP-technologie reiken van zaal- of cinemaprojectoren, foto-ontwikkeling, volumetrische displays, lithografie, breedband-lichtmodulatie, telecommunicatie, holografie, microscopie, spectroscopie, metrologie tot draagbare displays [25, 26].

De veel snellere pixelreactietijd, mindere golfengteafhankelijkheid, de mogelijkheid tot grotere lichtstroom en de bijna complete digitale werking ten op zichte van de concurrerende LCD (*Liquid Crystal Display*)-technologie zijn dé troeven van de DLP-technologie [25].

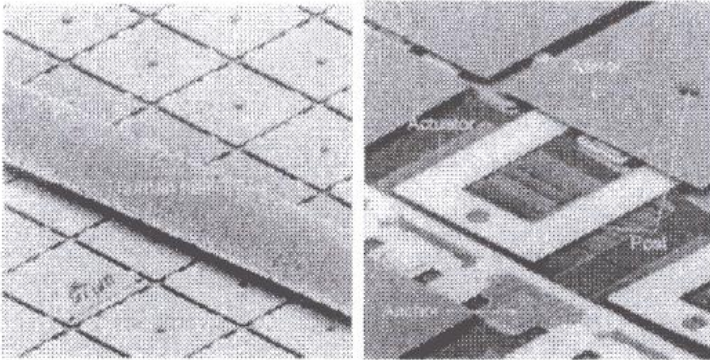
DLP-cinemaprojectoren onderscheiden zich van klassieke filmprojectoren door de consistente kleuren, helderheid, uniformiteit en contrast [32]. De waarde van deze eigenschappen ligt weliswaar lager maar de grote variatie in kleur, contrast en resolutie maakt van de klassieke filmprojector een geklopte tegenstander.

Er zijn ook enkele nadelen aan deze displaytechnologie. De voornaamste zijn het contoureffect en het regenboogeffect of *color break up*. Bij een kleursequentieel DMD-display neemt de gebruiker bij het snel met de ogen bewegen over het beeld, een schakering van kleuren waar. Deze 'regenboogjes' zijn het gevolg van het niet snel genoeg alterneren van de kleuren door het kleurenwiel [33]. Ook vormt het contoureffect een probleem. Bij de lage intensiteiten worden door een te lage resolutie zichtbare contouren weergegeven in het geprojecteerde beeld (zie ook Sectie 4.1.2).

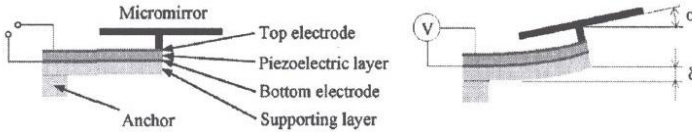
1.3.2 TMA-display

De TMA-matrix (*Thin-film Micromirror Array*) van *Daewoo Electronics* voorgesteld in [34] bestaat uit piëzo-elektrisch aangestuurde microspiegels (zie Figuur 1.23(a)). De vierkante $97\mu\text{m}$ -zijdige microspiegel wordt ge-

steund door een cantilever waarin een piëzo-elektrische PZT (Lood Zirkonaat Titanaat)-laag is ingebed tussen twee elektrodelagen. Als een elektrische spanning wordt aangelegd over deze boven- en onderelektrode, trekt de PZT-laag samen in de horizontale richting, waardoor de cantilever naar boven tilt. Hierdoor krijgt de spiegel een tilthoek α zoals aangeduid in Figuur 1.23(b).



(a) SEM-foto's van TMA microspiegels (Links: samen met een mensenhaar, Rechts: samen met de onderliggende cantileverstructuur)



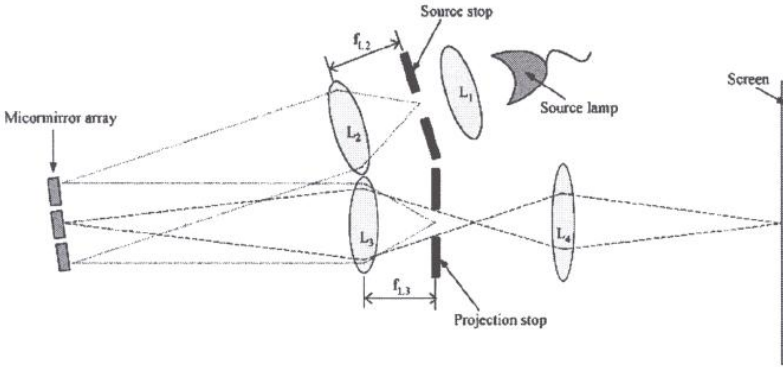
(b) Links: Niet-geactueerde TMA-microspiegel, Rechts: Geactueerde TMA-microspiegel

Figuur 1.23: De TMA-microspiegel [34].

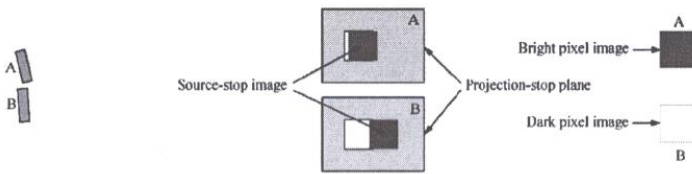
In Figuur 1.24(a) wordt de projectieopstelling voor het TMA-display weergegeven. Het licht van de lichtbron wordt opgevangen door lens L_1 en gaat door het diafragma. De lens L_2 collimeert dit licht en belicht de microspiegelchip met parallelle stralen als een vlakke golf. Lens L_3 focust de gereflecteerde lichtbundel op de projectiestop, die de afbeelding is van de diafragmastop. Finaal beeldt lens L_4 de microspiegelmatrix op het scherm af.

Elke pixel op het scherm komt overeen met één microspiegel uit de matrix. Figuur 1.24(b) toont hoe de grijswaarde voor een pixel varieert met de overeenkomstige tilthoek α . De tilthoek van microspiegel A zorgt ervoor dat het weerkaatste licht bijna volledig door de opening van de projectiestop gaat. Dit geeft een heldere pixel op het scherm. Voor microspiegel B is de

tilthoek zo dat het meeste weerkaatste licht door de projectiestop wordt tegengehouden en zo een donkere pixel op het scherm oplevert. De echte tilthoek varieert tussen 0° en 3° [34].



(a) Projectieopstelling



(b) Heldere en donkere pixelafbeelding

Figuur 1.24: Overzicht van het TMA-display [34].

1.3.3 Mirasol-display

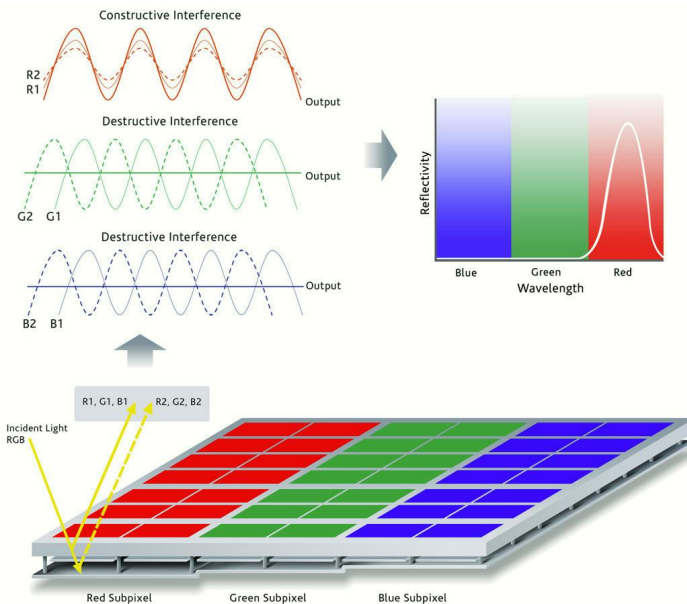
Het *Mirasol*-display van *Qualcomm* is gebaseerd op de interferometrische modulator of IMod [35, 36]. De IMod is in feite een eenvoudige regelbare optische caviteit. Ze bestaat uit een transparant glassubstraat met daaronder een zelfondersteunend, reflecterend en vervormbaar membraan met een geleidende 'dunne filmstapel' of elektrode ertussen (zie Figuur 1.25). Dit gedraagt zich als een spiegel van een optische caviteit. Omgevingslicht wordt teruggekaatst door de filmstapel en ook door het membraan. Het door het membraan gereflecteerde licht zal een faseverschil verkrijgen ten opzichte van het gereflecteerde licht door de filmstapel of elektrode. Op basis van dit faseverschil zullen sommige golflengtes constructief interfereren, andere destructief. Er zijn drie verschillende caviteitshoogtes, die zo elk apart resulteren in een andere gevormde kleur. De drie verschillende caviteiten

fungeren zo ogenschijnlijk als een rode, groene of blauwe subpizelement. Het uiteindelijke kleurendisplay wordt bereikt door de rode, groene en blauwe IMod-elementen te ordenen tot de pixel zoals in Figuur 1.25 [36].

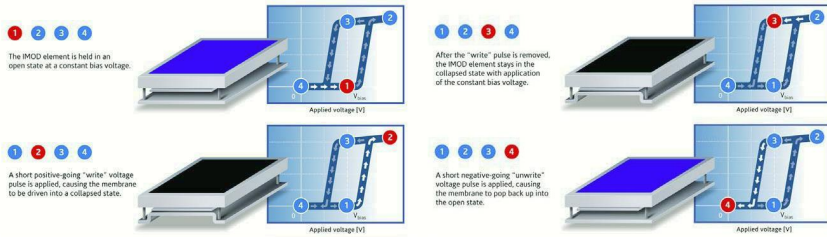
Door een bepaalde elektrische spanning aan te leggen over de elektrode en het membraan zal die laatste door elektrostatische aantrekking inkappen. De veranderde toestand van de caviteit zal ervoor zorgen dat voor de desbetreffende subpixel constructieve interferentie voor UV-golflengtes optreedt. Het beeld is voor het menselijke oog bijgevolg zwart.

De spanning die nodig is om het membraan te doen inkappen is hoger en verschilt dus van de loslaatspanning. Er treedt namelijk een hysteresiseffect op bij het aansturen van deze IMod-caviteiten. De procedure om een blauw subpizelement in de zwarte toestand te brengen en vervolgens terug naar blauw staat afgebeeld in Figuur 1.26.

Het kenmerkende aan dit reflectieve display is de papierachtige leesbaarheid bij verschillende omgevingsomstandigheden, de hoge reactiesnelheid en het minieme vermogenverbruik, ideaal voor mobiele toepassingen zoals *smartphones* [36].



Figuur 1.25: IMod-pixel samen met de werking van een rood subpizelement ter illustratie [36].



Figuur 1.26: Hysteresiseffect bij een blauw IMod-subpizelement [36].

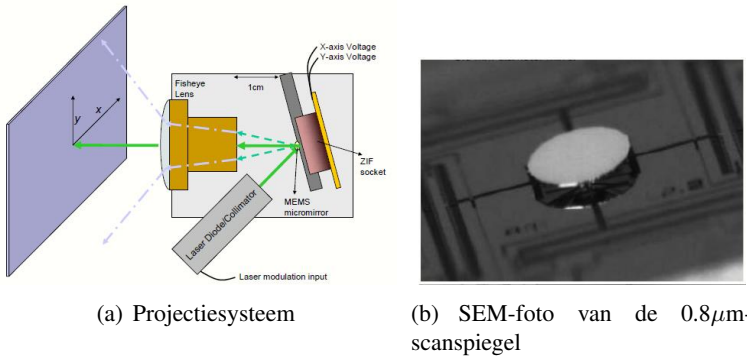
1.3.4 Scanspiegeldisplay

Het is ook mogelijk een display te bekomen met behulp van één enkele microspiegel, een scanmicrospiegel. De scanmicrospiegel met een diameter van 0.8mm uit [37] (zie Figuur 1.27(b)) kan rond 2 assen roteren met behulp van zogenoemde kamgestuurde actuatoren en kan heel snel het beeldscherm afscannen, vergelijkbaar met de kathodestraalbuis (CRT)-televisie. Rij per rij wordt van links naar rechts afgelopen om zo het hele beeld uiteindelijk punt per punt af te 'scannen'. Figuur 1.27(a) toont een gecollimeerde laserstraal gericht op de scanspiegel. Door de spiegelrotatie rond x- en y-as wordt de laserstraal gereflecteerd volgens een andere hoek. Het visuo-objectief (*fish-eye-lens*) vergroot de oorspronkelijke optische scanhoek van maximaal 16° voor beide richtingen naar een brede projectiehoek tot 120° . Dit systeem is compact, vergt een minimaal vermogenverbruik en is dus ideaal voor draagbare en mobiele toepassingen [38] zoals een draagbare projector of picoprojector.

Scanspiegeldisplays zijn evenwel beperkt qua resolutie. Een hoge resolutie vergt een grote, ultra-vlakke spiegel, hetgeen een snelle rotatie moeilijk maakt [35, 37–39]. Er zijn ook veiligheidsbepaalingen, zoals een stilstaande, krachtige laserbundel in geval van een bewegingloze scanspiegel.

1.3.5 Schakelspiegels

Microspiegels worden ook gebruikt bij optische datacommunicatie. Deze spiegels zijn typisch groter dan bij displays om de volledige lichtbundel met een diameter van de orde van enkele honderden μm op te kunnen vangen. De spiegels worden ook in een matrix opgesteld en kantelen of schakelen tussen verschillende rotatiestanden. Hierdoor worden de verschillende inkomende bundels verbonden met de te selecteren optische vezelkanalen.



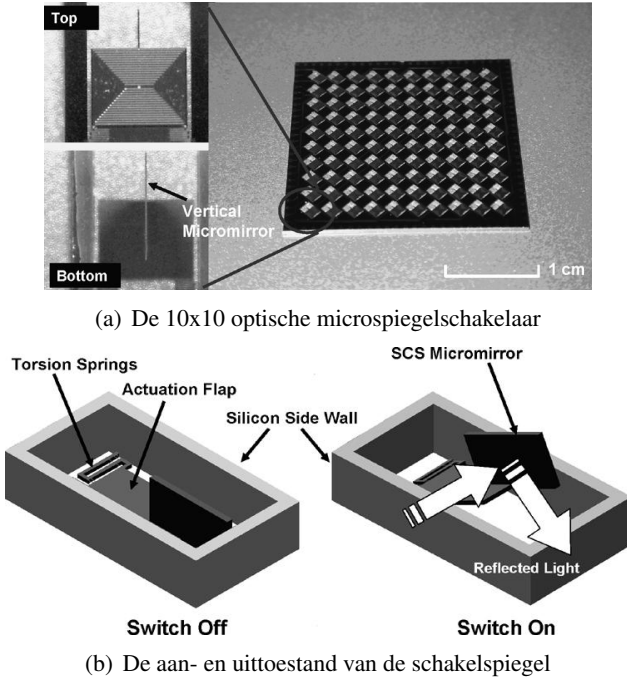
Figuur 1.27: Overzicht van het scanspiegeldisplay uit [38].

De 10×10 -matrix uit Figuur 1.28(a) toont een tweedimensionale optische matrixschakelaar met verticaal opgestelde microspiegels die niet elektrostatisch, maar elektromagnetisch worden aangestuurd [40]. De spiegels met een oppervlakte van $500\mu\text{m} \times 1200\mu\text{m}$ staan verticaal op een juk met onderaan een metalen winding. Onder dit juk bevindt zich een permanente magneet en wanneer een stroom door de winding loopt, zorgt de elektromagnetische kracht dat deze structuur opwaarts uit de caviteit wordt geduwd. Deze twee schakeltoestanden worden afgebeeld in Figuur 1.28(b). Het schakelen gebeurt met een minieme spanning van 0.7V en een schakeltijd van 6ms .

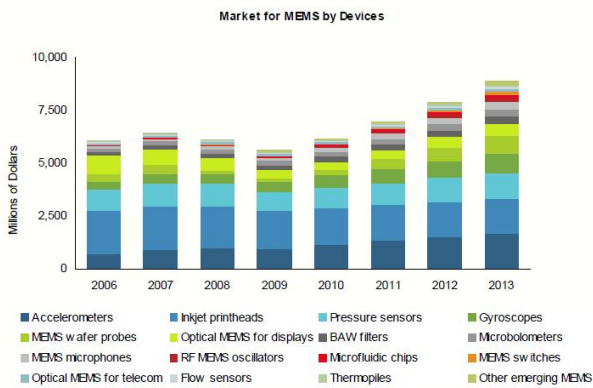
1.4 MEMS-markt

In deze sectie wordt de recente evolutie van de MEMS-markt toegelicht aan de hand van cijfers samengesteld door *J r mie Bouchaud* van het marktonderzoeksbedrijf *iSuppli* [41]. De afgebeelde omzetcijfers tot en met 2010 (in miljoenen US \$) in Figuur 1.29 staan samen afgebeeld met een voorspelling voor de jaren 2011, 2012 en 2013. De evolutie van de globale MEMS-markt volgt een zogenoemde 'hype-curve' [42]. Deze curve komt vaak voor bij nieuwe technologieën. Na de start van de technologie is er een grote verwachting ingelost door een verkoopspek zoals in 2007. Daarna volgt de ontgoocheling door het niet inlossen van de verdere verwachting. Na een lichte verkoopsstijging volgt een stabiele periode voor de technologie. Deze vorm valt te herkennen in Figuur 1.29 samen met de plethora aan toepassingsdomeinen zoals al geïllustreerd in sectie 1.2.

In Figuur 1.30 wordt de top tien van MEMS-producerende bedrijven in 2010 getoond met de omzetcijfers in miljoenen US \$. Hierbij merken we



Figuur 1.28: Overzicht van de tweedimensionale optische matrixschakelaar uit [40]



Figuur 1.29: iSuppli's voorspelling voor de inkomsten van de globale MEMS-consumptie en mobiele markt vanaf 2006 (Juni 2010) [41].

op dat na 5 jaar *TI* opnieuw de grootste MEMS-producent werd in 2010 met een omzet van 793 miljoen US \$. Dit illustreert het stijgende en dalende succes van MEMS. Na het verdwijnen op de *rear*-projectie televisiemarkt, versterkte *TI* zijn positie weer met de stijgende vraag naar *front*-projectoren en picoprojectoren.

Top 10 MEMS IDM and Fabless Manufacturers in 2010
(Ranking by Revenue in Millions of U.S. Dollars)

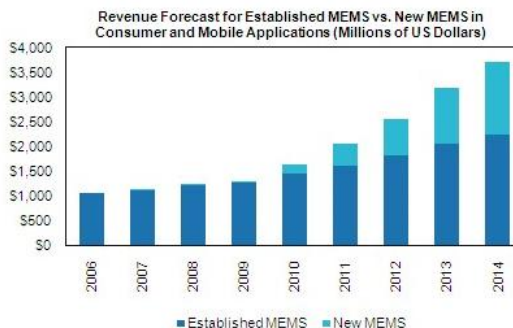
Rank	Company	2009	2010	Annual Growth
1	Texas Instruments*	\$635	\$793	24.9%
2	HP	\$784	\$782	-0.3%
3	Bosch	\$440	\$643	46.1%
4	Canon	\$331	\$355	7.1%
5	STMicroelectronics*	\$221	\$354	60.2%
6	Panasonic	\$235	\$293	24.5%
7	Epson	\$277	\$264	-4.6%
8	Freescale	\$195	\$240	23.1%
9	Avago	\$196	\$207	5.9%
10	Analog Devices	\$169	\$205	21.3%

* MEMS foundry revenue not included

Source: IHS iSuppli March 2011

Figuur 1.30: iSuppli's top tien globale MEMS-consumptie voor 2009 en 2010 [41] (Maart 2011).

Men voorspelt dat de 'nieuwe' MEMS een sterke groei zullen veroorzaken in MEMS-verkoop wanneer we ons enkel toespitsen op de consumptie-elektronica en mobiele telefoonindustrie. Deze 'nieuwe' MEMS waarvan in 2006 amper sprake was, omvatten onder meer de 3-as-gyroscopen en picoprojectoren. Er wordt verwacht dat deze 'nieuwe' MEMS in 2014 al 39.5% van de totale omzet zullen bereiken (zie *Figuur 1.31*) [41].



Source: IHS iSuppli Research, April 2011

Figuur 1.31: iSuppli's voorspelling voor de inkomsten van de MEMS-consumptie en mobiele markt vanaf 2006 [41] (April 2011).

1.5 Conclusie

MEMS-sensoren en -actuatoren kennen hun applicatie in verschillende domeinen. Dit kunnen we verklaren door het feit dat ze kleiner, lichter en goedkoper kunnen geproduceerd worden dan andere analoge implementaties. De verschillende fysische eigenschappen waarop ze betrekking hebben zijn bijvoorbeeld druk, temperatuur, versnelling, rek, licht, enz. MEMS-technologieën zijn onderhevig aan veel onderzoek en vaak is het een werk van lange adem. Zo is het schoolvoorbeeld van een MEMS-microspiegel TI's DMD. Het succes ervan is het gevolg van intens onderzoek naar en verbetering van het DMD-ontwerp sinds de uitvinding ervan in 1987. Het hierop gebaseerde projectiedisplay vindt zijn voordelen in een snellere pixelreactietijd, mindere golflengteafhankelijkheid, mogelijkheid tot grotere lichtstroom en bijna geheel digitale werking ten opzichte van het LCD-display .

Referenties

- [1] S. D. Senturia. *Microsystem Design*. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [2] <http://www.akustica.com>. *AKU230 digital microphone chip*.
- [3] R. J. Wilfinger and P. H. Bardell. *The resonistor: a frequency selective device utilizing the mechanical resonance of a silicon substrate*. IBM Journal of Research and Development, 12(1), 1968.
- [4] C. Liu. *Recent Developments in Polymer MEMS*. Advanced Materials, 19(22):3783–3790, 2007.
- [5] V. Sazonova, Y. Yaish, H. Üstüel, D. Roundy, T. A. Arias, and P. L. McEuen. *A tunable carbon nanotube electromechanical oscillator*. NATURE, 431(7006):284–287, 2004.
- [6] C. Faschinger and G. Mossböck. *Continuous 24 h monitoring of changes in intraocular pressure with the wireless contact lens sensor Triggerfish (TM). First results in patients*. OPHTHALMOLOGE, 107(10):918–922, 2010.
- [7] <http://www.ziemergroup.com/products/pascal.html>. *De PASCAL Dynamic Contour Tonometer*.
- [8] <http://www.eetimes.com/electronics-news/4212247/MEMS-microphones-integrate-interchip-sound>. *MEMS microphones integrate interchip sound*.
- [9] <http://www.akustica.com>. *AKU2002C digital MEMS microphone*.
- [10] <http://www.invensense.com/>. *IDG-600*.
- [11] C.M. Sun, M.-H. Tsai, C. Wang, Y.-C. Liu, and W. Fang. *Implementation of a Monolithic TPMS Using CMOS-MEMS Technique*. In TRANSDUCERS 2009, pages 1730–1733, Denver, CO, USA, 2009.
- [12] S. K. Nezhadian, G. Rezazadeh, and S. K. Arya. *MEMS Tunneling Micro Thermometer Based on Tip Deflection of Bimetallic Cantilever Beam*. Sensors & Transducers Journal, 84(10):1660–1668, 2007.
- [13] P.-H. Kao, P.-J. Shih, C.-L. Dai, and M.-C. Liu. *Fabrication and Characterization of CMOS-MEMS Thermoelectric Micro Generators*. SENSORS, 10(2):1315–1325, 2010.

- [14] S. Merzaghi, C. Koechli, and Y. Perriard. *Development of a Hybrid MEMS BLDC Micromotor*. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, 47(1):3–11, 2011.
- [15] D.V. Dao, P. H. Phama, S. Amaya, and S. Sugiyama. *Micro Ratcheting Transmission Systems Based on Electrostatic Actuator*. Sensors & Transducers Journal, 84(10):1660–1668, 2007.
- [16] J. L. Vaught, F. L. Cloutier, D. K. Donald, J. D. Meyer, C. A. Tacklind, and H. H. Taub. *Thermal ink jet printer*. U.S. Patent 4 490 72, 1984.
- [17] Hewlett-Packard Co. *HEWLETT-PACKARD JOURNAL*. Hewlett-Packard Co., mei 2011.
- [18] T. Lindemann, H. Ashauer, D. S. Sassano, R. Zengerle, and P. Koltay. *One Inch Thermal Bubble Jet Printhead With Laser Structured Integrated Polyimide Nozzle Plate*. Journal of Microelectromechanical Systems, 16(2):428, 2007.
- [19] S. Rudra, J. Roels, G. Bryce, L. Haspelslagh, A. Witvrouw, and D. Van Thourhout. *SiGe based Grating Light Valves: A leap towards monolithic integration of MOEMS*. Microelectronic Engineering, 87:1195–119, 2010.
- [20] A. Kenda, M. Kraft, C. Wagner, B. Lendl, and A. Wolter. *MEMS-based spectrometric sensor for the measurement of dissolved CO₂*. In Sensors, 2008 IEEE, pages 724–727, Lecce, Italy, 2008.
- [21] B. Kim, J. Sinibaldi, and G. Karunasiri. *MEMS Scanning Diffraction Grating Spectrometer*. In Optical MEMS and Their Applications Conference, 2006. IEEE/LEOS International Conference on, pages 46–47, Big Sky, MT, USA, 2006.
- [22] G. M. Rebeiz. *RF MEMS: Theory, Design, and Technology*. John Wiley & Sons, 2003.
- [23] R. Chan, R. Lesnick, D. Becher, and M. Feng. *Low-Actuation Voltage RF MEMS Shunt Switch With Cold Switching Lifetime of Seven Billion Cycles*. JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, 12(5):713–719, 2003.
- [24] P. F. Van Kessel, L. J. Hornbeck, R. E. Meier, and M. R. Douglass. *A MEMS-Based Projection Display*. Proceedings of the IEEE, 86(8):1687–1704, 1998.

- [25] D. Dudley, W. Duncan, and J. Slaughter. *Emerging Digital Micromirror Device (DMD) Applications*. MOEMS Display and Imaging Systems: Proceedings of the SPIE, 4985(14), 2003.
- [26] <http://www.ti.com/>. *DLP 0.17 HVGA DDR Series 210 DMD*.
- [27] L. J. Hornbeck. *Digital Light Processing™ for High-Brightness, High-Resolution Applications*, 2007.
- [28] J. Wang, J. Huffman, P. Pinheiro, and J. Hall. *An Integrated Low-Power High-Voltage Driving Circuit for Digital Micromirror Devices (DMD™)*. In Consumer Electronics, 2009. ICCE '09. Digest of Technical Papers International Conference on, pages 1–2, Las Vegas, NV, USA, 2009.
- [29] L. J. Hornbeck. *Digital Light Processing and MEMS: Timely Convergence for a Bright Future (Invited Plenary Paper)*. Proceedings of the SPIE: Micromachining and Microfabrication Process Technology, 2639:2–26, 1995.
- [30] J. Huffman and C. Gong. *An Integrated Low-Power High-Voltage Driving Circuit for Digital Micromirror Devices (DMD™)*. In Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting, 2005. Proceedings of the, pages 163–168, 2005.
- [31] Texas Instruments' 'Digital Light Processing'. <http://www.dlp.com/>.
- [32] G. P. Pinho. *Optics of Digital Cinema*. In Projection Displays IX. (SPIE), volume 5002, pages 123–131, 2003.
- [33] I. Miettinen, R. Nasanen, and J. Hakkinen. *Effects of Saccade Length and Target Luminance on the Refresh Frequency Threshold for the Visibility of Color Break-Up*. Display Technology, Journal of, 4(1), 2008.
- [34] Y.S. Jo, D.-S. Yoon, S.-W. Kim, and K.-H. Hwang. *Optical performance evaluation of thin-film micromirror array in projection display*. Optical Engineering, 41(2):409–415, 2002.
- [35] C.-D. Liao and J.-C. Tsai. *The evolution of MEMS displays*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(4):1057–1065, 2009.
- [36] Qualcomm MEMS Technol. Inc. *Interferometric Modulator (IMOD) Technology Overview - White Paper*, 2007.

-
- [37] S. Pal, K. Jia, and H. Xie. *An Electrothermal Micromirror with High Linear Scanning Efficiency*. In Lasers and Electro-Optics Society, 2007. LEOS 2007. The 20th Annual Meeting of the IEEE, pages 914–915, Lake Buena Vista, FL, USA, 2007.
- [38] V. Milanovic, K. Castelino, and D. T. McCormick. *Highly adaptable MEMS-based display with wide projection angle*. In Micro Electro Mechanical Systems, 2007. MEMS. IEEE 20th International Conference on, pages 143–146, Hyogo, Japan, 2007.
- [39] S. Pal and H. Xie. *Pre-Shaped Open Loop Drive of Electrothermal Micromirror by Continuous and Pulse Width Modulated Waveforms*. IEEE Journal of Quantum Electronics, 46(9):1254–1260, 2010.
- [40] G.-D. Su, C.-W. Chiu, and F. Jiang. *Vertical Micromirrors Integrated with Electromagnetic Microactuators for Two-Dimensional Optical Matrix Switches*. IEEE Photonics Technology Letters, 17(9):1860–1862, 2005.
- [41] <http://www.iSuppli.com/>.
- [42] <http://www.Gartner.com/>.

2

SiGe-technologie

2.1 MEMS-technologieën

Elke MEMS-technologie start van een basisplaat of substraat. Gebruikelijk is dit een zogenoemde *wafer* uit monokristallijn silicium, maar ook andere stoffen zoals kwarts of glas zijn mogelijk [1]. Eerder werd al vermeld dat MEMS worden gecreëerd met behulp van drie soorten processtappen. Deze zijn de depositie, i.e. het aanbrengen van dunne lagen materiaal, de lithografie, i.e. het overbrengen van patronen in een fotogevoelige maskerslaag en het etsen, i.e. het verwijderen van materiaal op de gewenste plaatsen. Fotolithografie is een cruciale processtap geworden bij het fabriceren van elektronica en ook MEMS. In de volgende sectie wordt dit kort toegelicht alvorens de belangrijkste categorieën in MEMS-technologie worden besproken zoals *bulk-micromachining* en *oppervlakte-micromachining*. Verder komen de doelstellingen van het Gemini-project aan bod. De voordelen van de monolithische benadering van SiGe-MEMS op CMOS worden toegelicht. De drie ontwikkelde demonstratoren binnen dit SiGe-platform worden nader belicht. De microspiegels en diffractieroosters maken deel uit van de dunne filmmodule. Voor de accelerometers is een dikkere structuurlaag nodig. Voor deze dikke filmmodule alsook de dunne filmmodule worden de processtappen toegelicht in Sectie 2.2.1. Voor de dunne filmmodule werd een tijdelijke verpakking ontwikkeld. Een optimalisatie voor het verwijderen hiervan werd gevonden in samenwerking met *Sukumar Rudra*

(*Photonics*, UGent). Dit wordt voorgesteld in Sectie 2.3.

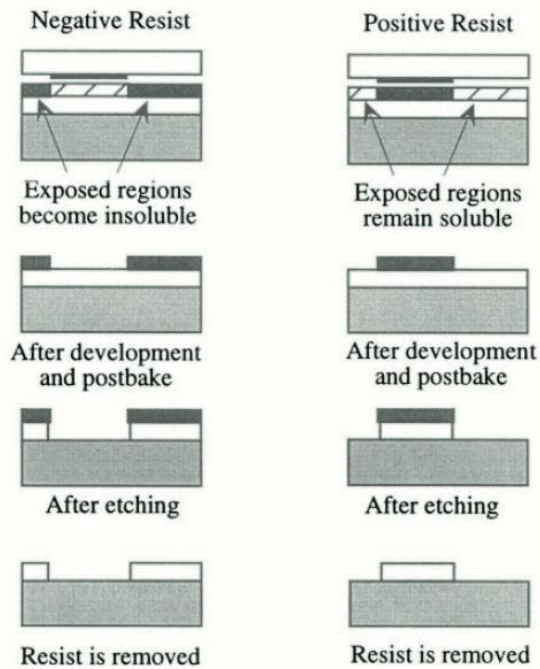
2.1.1 Fotolithografie

Optische lithografie of fotolithografie valt op zekere manier te vergelijken met hoe foto's worden ontwikkeld. Hierbij wordt licht door het negatief geprojecteerd op fotogevoelig papier. Het patroon wordt overgebracht en de foto is ontwikkeld. Bij fotolithografie is er uiteraard geen sprake van papier, maar wel van een polymeer dat fotogevoelig is, de fotoresist genoemd [1]. Het fotomasker bevat het patroon dat dient getransfereerd te worden door middel van ondoorschijnende en transparante gebieden. Wanneer het deel van de fotoresist onder invloed van licht uithardt en de andere delen oplosbaar blijven, spreekt men van een negatieve fotoresist. Bij een positieve fotoresist worden de belichte delen juist oplosbaar [1].

In Figuur 2.1 staan de fotolithografische basisstappen schematisch weergegeven voor zowel de negatieve als de positieve resist. Het fotomasker is in beide gevallen hetzelfde. Alvorens de fotoresist wordt belicht (meestal met UV-licht), wordt ze eerst 'voorgebakken' in de *prebake*-stap. De belichte delen fotoresist worden vervolgens onoplosbaar en oplosbaar voor respectievelijk een negatieve en positieve resist. In de ontwikkelstap worden de gewenste delen resist opgelost en zo verwijderd. Na een tweede keer 'bakken' tijdens de *postbake*-stap, kan er worden geëtst. De met resist bedekte delen worden gespaard, de niet-bedekte delen materiaal worden verwijderd of weggeëtst. Etsen kan isotroop of anisotroop gebeuren. Wanneer in een laatste stap de resist wordt verwijderd, is het patroon van het fotomasker overgebracht in het materiaal.

Bij contactlithografie is er rechtstreeks contact tussen het masker en het *wafer*oppervlak. Het patroon in het materiaal is even groot zoals op het masker. Bij projectie-lithografie zorgt de projectieoptica daarentegen dat het masker verkleind wordt gefocust en afgebeeld op het oppervlak van de *wafer*. Zo kan een veel grotere nauwkeurigheid worden verkregen voor de MEMS-afmetingen. Typisch wordt dan een zogenoemde *stepper* gebruikt, waarmee hetzelfde maskerpatroon (vaak één chipontwerp) verschillende keren wordt overgebracht op eenzelfde *wafer* [1].

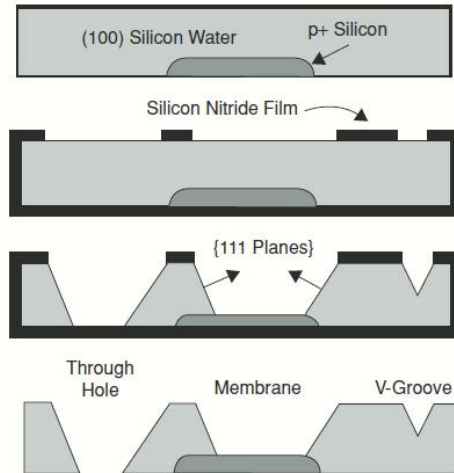
Enkele courant toegepaste MEMS-technologieën zoals '*bulk-micromachining*' en '*oppervlakte-micromachining*' worden in de volgende secties beschreven.



Figuur 2.1: Het fotolithografisch overbrengen van een patroon van eenzelfde fotomasker op negatieve en positieve fotoresist [1].

2.1.2 Bulk-micromachining

Bij *bulk-micromachining* worden MEMS verkregen door in het substraat zelf te etsen. De kristallografische oriëntatie van silicium (kubisch) is hierbij een belangrijke factor. Zo worden conventioneel (100) siliciumwafers gebruikt [1]. Het etsen kan uitgevoerd worden met behulp van natte of droge plasmaprocessen [2]. Men spreekt van nat en droog etsen. Bij bijvoorbeeld nat anisotropisch etsen werkt het vloeibare etsmiddel in volgens discrete kristalvlakken [3]. Het anisotroop etsen kan door deze eigenschappen van monokristallijn silicium verschillende complexe driedimensionale structuren met hoge precisie creëren zoals v-groeven, microkanaaltjes of gaatjes. Ook belangrijk is de materiaalselectiviteit van het etsen, zodat gewenste materiaalagen worden verwijderd en tegelijkertijd andere ongeschonden worden gelaten [3]. In Figuur 2.2 worden de typische stappen van MEMS-*bulk-micromachining* geïllustreerd. Hierbij zorgt siliciumnitride (Si_3N_4) voor het etspatroon [2]. Het gedopeerde p+ silicium blijft ongeschonden bij het etsen en vormt zo een membraan, de basisstructuur voor bijvoorbeeld druksensoren.



Figuur 2.2: Enkele typische stappen bij MEMS-*bulk-micromachining* [2].

Een MEMS-realiserie m.b.v. *bulk-micromachining* is de Si-scanspiegel zoals in Figuur 2.3 [4]. De scanspiegel kan volgens twee assen roteren met behulp van twee concentrische ringen waaraan de spiegel is opgehangen. Met behulp van een permanente ringmagneet en een metalen spoel is het mogelijk om deze spiegel elektromagnetisch aan te sturen. Het fabri-

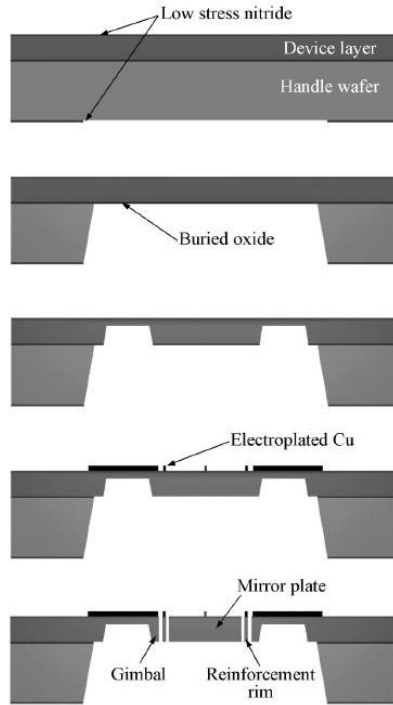
catieproces demonstreert enerzijds het wegetsen van een gedeelte van het Si-substraat samen met de extra aangebrachte Si-laag en anderzijds het aanbrengen van de koperbaantjes (zie Figuur 2.3(a)). Figuur 2.3(b) toont een foto van de gerealiseerde scanspiegel.

2.1.3 Oppervlakte-micromachining

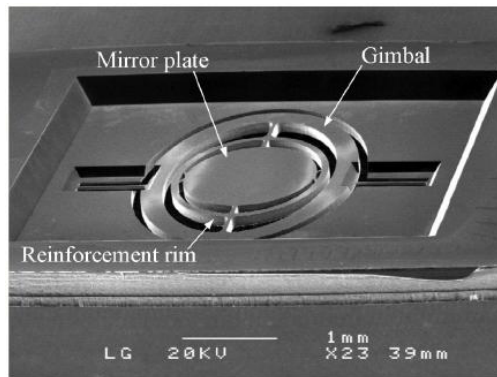
In vergelijking met *bulk-micromachining* werkt oppervlakte-*micromachining* enkel aan de bovenzijde van de *wafer* [5]. De driedimensionale micromechanische structuren worden opgebouwd via het één na één stapelen van verschillende patronen van dunne films. Kleinere structuren kunnen worden gecreëerd met een betere controle op de afmetingen. Ook kan de grootte van de totale MEMS-oppervlakte kleiner worden gehouden dan bij *bulk-micromachining* [5].

Vaak wordt er vertrokken van een Si-substraat waarop een elektrisch isolerende substraatlaag is aangebracht [3]. Gebruikmakende van de depositie-, patroon- en etsstappen worden de vrijstaande MEMS bekomen [2]. Typisch wordt een sacrificiële- en structuurlaag herkend. Figuur 2.4 toont hoe de sacrificiële laag op het substraat wordt gedeponereerd. Hierin worden de noodzakelijke openingen weggeëtsd voor de toekomstige pontons, i.e. de steunpunten voor de microspegel. Vervolgens wordt de uiteindelijke MEMS-laag of structuurlaag aangebracht bovenop de sacrificiële laag. Die doet dienst als *spacer*-laag en zorgt voor ruimte tussen de structuurlaag en het substraat. Het wegetsen van de overige niet-MEMS-gedeeltes van de structuurlaag gebeurt vaak selectief zodat de onderliggende sacrificiële laag nog niet wordt meegeëtsd. Als laatste stap wordt de sacrificiële laag isotroop weggeëtsd zodat de te bewegen MEMS-structuur vrij komt te staan en ondersteund wordt via de ankers. Figuur 2.4 illustreert de realisatie van een eenvoudige MEMS-cantilever. Verschillende materiaal-lagen en -combinaties kunnen worden gebruikt. De structuurlaag kan zo bijvoorbeeld geselecteerd worden uit een resem materialen zoals polysilicium, Si_3N_4 , polyimide, wolfram, enz. [3]. Bij de DMD-microspegel (zie Sectie 1.3.1.1) is de structuurlaag een Al-legering [6].

Ter illustratie wordt de '*processflow*' (i.e. het overzicht van de processtappen) van de DMD-'superstructuur' in Figuur 2.5 gegeven [6]. De microspegel wordt gerealiseerd bovenop een CMOS-geheugencircuit. Een dikke oxidelaag wordt gedeponereerd op de metaal-2-laag van het CMOS en daarna vlak gemaakt met de techniek *chemical-mechanical polish* (CMP). Het vlakke substraat voorziet een kwalitatieve uniformiteit ten voordele van de projectorhelderheid en contrastverhouding [6]. In totaal realiseren zes fotomaskerlagen de uiteindelijke superstructuur.

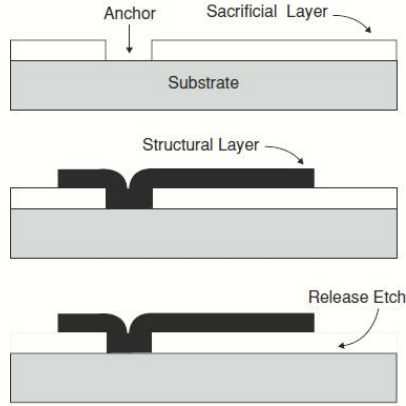


(a) Fabricatieproces

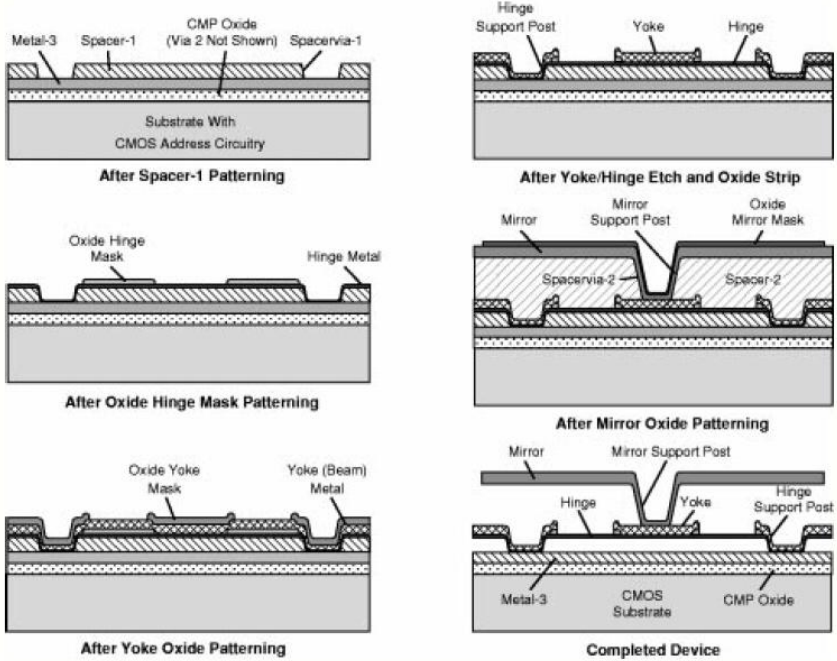


(b) Realisatie

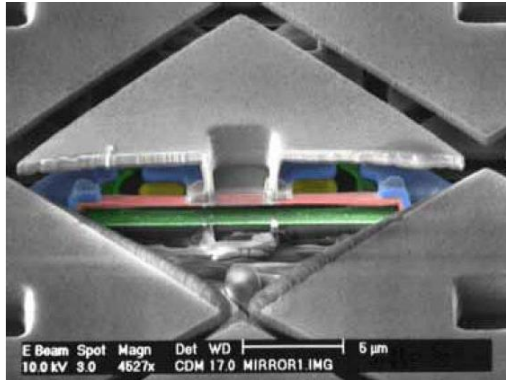
Figuur 2.3: De tweedimensionale elektromagnetische scanspiegel gemaakt m.b.v. bulk-micromachining zoals voorgesteld in [4].



Figuur 2.4: Enkele typische stappen van MEMS-oppervlakte-micromachining [2].



Figuur 2.5: Fabricatieproces van de DMD-structuur uit [6].



Figuur 2.6: SEM-foto van één doorgesneden DMD zoals vermeld in [7].

De mechanische structuurlagen bestaan uit een gesputterde aluminiumlegering. Ze vormen de metaal-3-laag voor de jukelektrodes, de hengsels, spiegelektrodes en de spiegel. Het plasma-etsproces gebruikt plasma-gedeponerd siliciumoxide (SiO_2) als etsmasker. De sacrificiële *spacer*lagen *spacer 1* en *spacer 2* bestaan uit diep-UV-geharde fotoresist. Die laatste wordt ook verwijderd via een plasma-etsen. Door de lage temperaturen waarbij het DMD-proces wordt uitgevoerd, worden de aluminiuminterconnecties niet stukgemaakt en is het mogelijk een volledige DMD-cel te vervaardigen. Uiteindelijk wordt de volledige DMD-spiegel bereikt die wordt ondersteund door het juk dat is opgehangen via twee hengsels. Figuur 2.6 toont enkele DMD-spiegels waarvan de helft van één spiegel werd verwijderd zodat een gelijkaardige doorsnede te zien is als bij de laatste procesfiguur van Figuur 2.5 [7].

2.1.4 Overige

Enkele andere MEMS-technologieën worden hier bondig toegelicht.

Het *Deep Reactive Ion Etching* (DRIE)-proces is een plasmaproces dat meer en meer wordt gebruikt om MEMS-structuren te verkrijgen die verschillende keren zo diep zijn als ze breed zijn [2]. Deze technieken worden benoemd onder HAR-processen (*High Aspect Ratio*) [5]. Verschillende HAR-microstructuren kunnen zo worden gecreëerd zoals veertjes, hengsels, kamelektrodes, capacitieve structuren, enz. [8].

Het LIGA (Duits: *Lithographie, Galvanoformung, Abformung*)-proces staat voor 'lithografie, *electroplating* en *molding*' [9]. Deze HAR-techniek realiseert MEMS die bestaan uit metaal, keramische of plastische materialen. X-stralen geproduceerd door *synchrotrons* fungeren als lithografische

lichtbron. In Figuur 2.7(a) wordt de werking schematisch weergegeven. Parallelle X-stralen vallen in op het masker met een absorbeerpatroon. De absorptie is voldoende hoog om de penetratie van X-stralen tegen te houden. Bij de open plaatsen wordt de straling doorgelaten en valt die in op de resist. Na ontwikkeling van de resist wordt op de overblijvende structuur via *electroplating* metaal aangebracht. Dit is de laatste stap. Men kan dit metaalgedeelte ook verder gebruiken als mal (Engels: *mold*) en replicaties vervaardigen uit andere materialen zoals plastische of keramische materialen. Deze manier is meer geschikt om hoge HAR-microstructuren te maken dan door gebruik van gewone optische lithografie (zie Figuur 2.7(b)), dit door de kortere golflengte, hogere penetratiediepte en grotere focusdiepte van de X-straling-fotons [9].

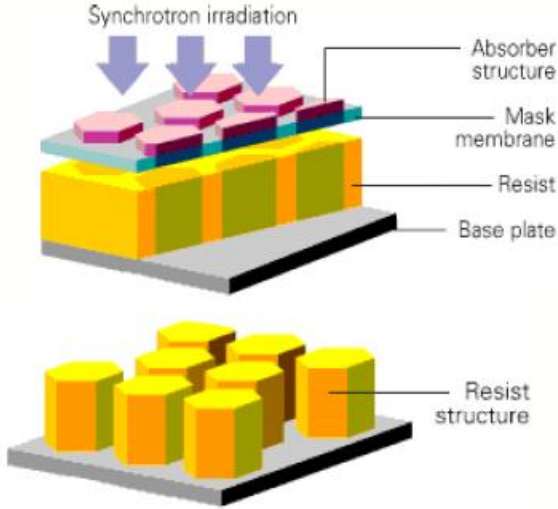
Als laatste illustratie is er de *waferbonding*-techniek waarbij twee *wafers* met elkaar worden verbonden d.m.v. warmte, druk, spanning of via een dunne verbindingslaag op de twee substraten [3, 5]. Deze techniek laat toe extra materiaal aan te brengen bij het *bulk-micromachining*-proces. Een Si-substraat kan worden verbonden met een ander Si-substraat, maar ook andere soorten *wafers* (zoals kwarts of pyrex [5]) zijn geschikt.

2.2 Gemini-platform

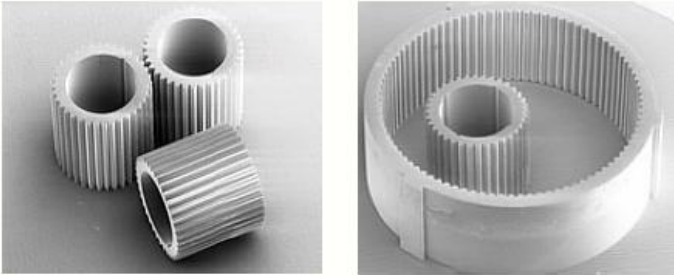
2.2.1 De monolithische SiGe-benadering

Elektronica is onontbeerlijk voor MEMS. Vaak wordt nog de hybride benadering toegepast waarbij de aparte MEMS- en CMOS-chip samen worden gebracht in dezelfde verpakking [10]. Dit kan enerzijds door de twee discrete chips naast of op elkaar te plaatsen, onderling te verbinden en te verpakken. Het voordeel is dat beide chips apart kunnen worden ontworpen en geoptimaliseerd en dit met een korte ontwikkeltijd. Een andere manier is de monolithische integratie van beide. Op hetzelfde substraat worden de MEMS en CMOS opgebouwd (zie Figuur 2.8). De twee technologieën dienen dan wel compatibel te zijn en een langere ontwikkeltijd is nodig. Doordat de twee delen optimaal geconnecteerd kunnen worden, geeft dit een betere performantie. Er zijn minder parasitaire effecten door de interconnecties zoals *bondpads* en lange verbindingsdraden [11]. Als de verkoopvolumes groot genoeg worden, zal de langere ontwikkeltijd hoogstwaarschijnlijk worden terugbetaald door een gereduceerde assemblage- en verpakkingskost [10]. MEMS-toepassingen zijn ondermeer systemen waar veel interconnecties noodzakelijk zijn (zoals bij microspiegelmatrices).

Een eerste soort monolithische combinatie is 'MEMS-eerst'. Hierbij worden de MEMS gerealiseerd alvorens de elektronica wordt opgebouwd.



(a) Schema



(b) Realisatie van PMMA-microtandwielen met 2mm-hoogte

Figuur 2.7: X-straling-lithografie [9].*Figuur 2.8: Hybride benadering (links) vs. monolithische integratie van MEMS en CMOS (rechts) [11].*

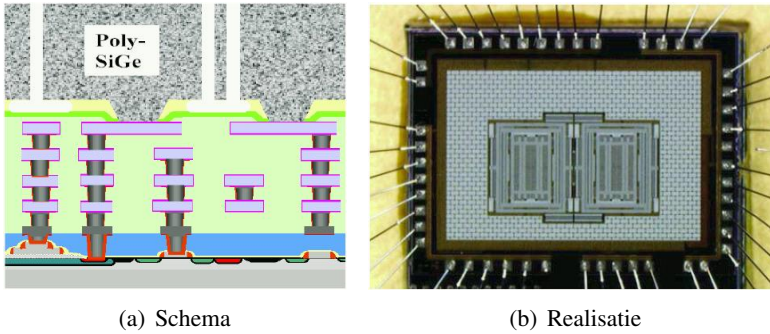
Voordeel is dat de noodzakelijke MEMS-depositietemperaturen hoog mogen zijn of, anders gezegd, het MEMS-temperatuurbudget niet beperkt is [11]. De elektronica wordt namelijk achteraf aangebracht. Een andere soort is de 'MEMS-samen', waarbij de MEMS en elektronica gemengd worden opgebouwd. Hierbij zijn de depositietemperaturen beperkt en is het IC (*Integrated Circuit*)- en MEMS-proces eerder gecompliceerd. Bij de derde soort, 'MEMS-laastst', worden MEMS na de CMOS en, wat typisch is, erbovenop aangebracht. Het temperatuurbudget is beperkt tot 450°C of 520°C, afhankelijk van de specifieke metallisatie en ontwerpisen [12]. De MEMS-integratie is wel transparant voor de elektronica. Door een modulaire benadering blijft een standaard IC-proces of recenter IC-proces mogelijk en kan de meest compacte vorm worden bereikt [10].

Bij de MEMS-laastst monolithische benadering stellen verschillende materialen zich kandidaat als MEMS-structuurlaag. Zo is aluminium een optie, maar is elastische onbetrouwbaarheid door 'kruip' wel een heikel punt [13]. Het leidt bijvoorbeeld tot een geheugeneffect in microspiegelhensels. Polykristallijn silicium vormt tevens een oplossing. Om de noodzakelijke lage interne spanning te verkrijgen is weliswaar een depositietemperatuur hoger dan 800°C nodig [12]. Daarom moet men zijn toevlucht zoeken tot een *waferbonding*-techniek om bv. Si-microspiegels te combineren met het CMOS-gedeelte [14].

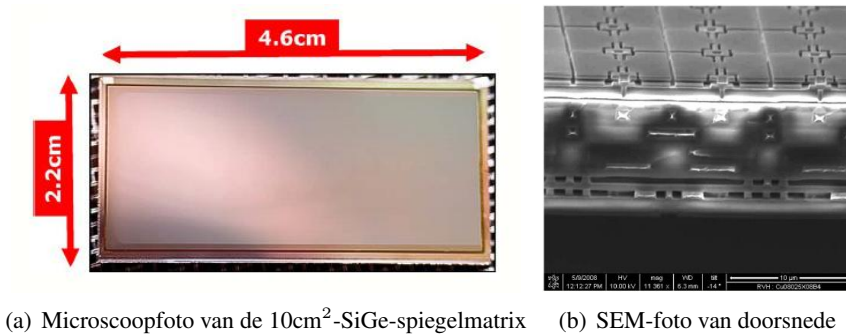
De maximale depositietemperatuur is immers beperkt om aantasting van de onderliggende CMOS-interconnecties tegen te gaan. Dé kandidaat is polykristallijn siliciumgermanium (SiGe), waarvan gedemonstreerd werd dat het een ideaal materiaal is voor de MEMS-laastst monolithische MEMS-CMOS-combinatie. De poly-SiGe-lagen hebben immers goede elektrische en mechanische eigenschappen [15]. Door de Ge in de SiGe-legering verlaagt zowel de smelttemperatuur als de overgangstemperatuur van amorf naar kristallijn. Op die manier vermindert het thermische budget om kwalitatieve MEMS-structuurlagen te vormen. Door de SiGe-legering *in situ* te doperen met boor en deze te deponeren op 450°C verkrijgt men een lage interne spanning en een goede geleidbaarheid [12]. Door de verhouding Ge ten opzichte van Si te verhogen, verbetert de kristallisatie. Een te hoog aandeel moet dan echter weer vermeden worden om onbetrouwbaarheid en oppervlakteruwheden tegen te gaan. Ge wordt meer beïnvloed door vochtigheid dan Si [12] en etst namelijk in waterstofperoxide, een bestanddeel van verschillende baden die in de micro-elektronica gebruikt worden. Afhankelijk van de maximaal toegelaten depositietemperatuur, kan de verhouding gevarieerd worden van 70% tot 40% [12]. Zo'n poly-SiGe-laag kan trouwens ook aangewend worden als verpakkingslaag om het CMOS-MEMS-geheel te beschermen tegen externe invloeden [16].

Zo werd onder andere al een SiGe-z-asgyroscop gerealiseerd met toepassing in de automobiellndustrie (zie in Figuur 2.9) [10, 17]. De gyroscop bestaat uit een $10\mu\text{m}$ dikke SiGe-laag bovenop een standaard CMOS-aandrijfschakeling. De resolutie is beter dan $0.05\text{ }^\circ/\text{s}$ bij een 50Hz-bandbreedte [17].

Ook werd een 11MegaPixel-SiGe-microspiegelmatrix geproduceerd die functioneert als een SLM bij optische maskerloze lithografie (zie Figuur 2.10) [13, 18]. De $8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$ microspiegels hebben een maximale vlakheidsafwijking door kromming of een zogenoemde *cupping* van minder dan 7nm. De RMS-ruwheid van het spiegeloppervlak ligt onder 1nm. Een stabiele actuatie van meer dan 2.5 teracycli [18] toont het ontbreken van hengselvermoeiing aan.



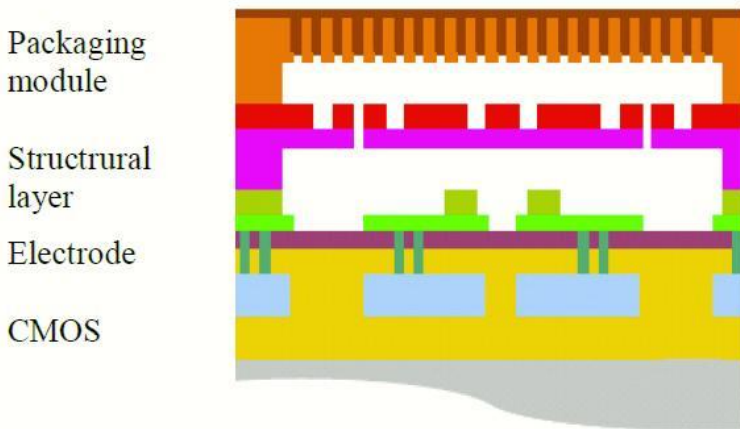
Figuur 2.9: SiGe-z-asgyroscop [17].



Figuur 2.10: De 11MegaPixel-SiGe-spiegelmatrix [18].

In het kader van het IWT ('Agentschap voor Innovatie door Wetenschap en Technologie') SBO ('Strategisch Basisonderzoek')-project Gemini (*Generic Electronics and Microsystems INtegration Initiative*) werden drie

demonstratoren ontwikkeld en onderzocht ter bevestiging van de generische aard van het monolithische SiGe-MEMS-op-CMOS-platform [16, 19]. Figuur 2.11 illustreert deze technologie waarmee SiGe-microspiegels, -diffractieroosters en -accelerometers werden gemaakt. Ze worden in de volgende sectie besproken. De microspiegels en diffractieroosters worden gerealiseerd met een $\sim 300\text{nm}$ dikke SiGe-structuurlaag met een extra 5nm-SiC- en 30nm-Al-laag voor een betere reflectie. Ze zijn onderdeel van de dunne filmmodule. De dikke filmmodule bevat een $4\mu\text{m}$ dikke structuurlaag voor de accelerometers om het capacitief uitlezen te bevorderen [16].

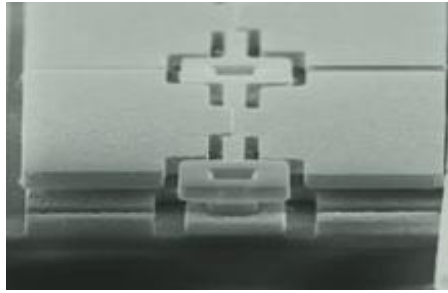


Figuur 2.11: SiGe-MEMS-platform [16].

2.2.2 Dunne filmmodule

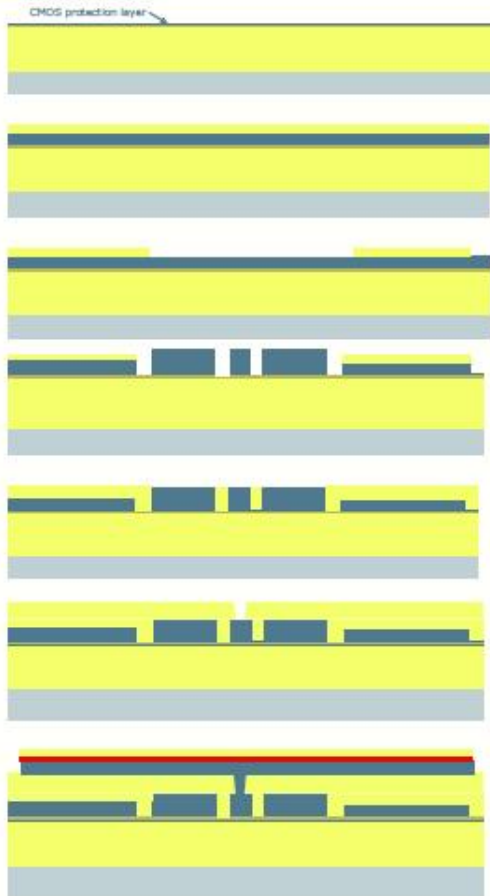
2.2.2.1 Microspiegels

Ontwerp De microspiegel (zie Figuur 2.12) van de 11MegaPixel-SiGe-spiegelmatrix is een ontwerp van *L. Haspelslagh*, die is gebaseerd op bestaande microspiegelontwerpen [18]. De spiegelgrootte bedraagt $7.7\mu\text{m}$ en de ruimte tussen spiegel en onderliggende elektrodes is 300nm . De microspiegels hebben een fasestapvorm en 'ingesneden' hengsels met een breedte van 350nm . De microspiegels in dit doctoraat zijn geïnspireerd op deze eerder uitgevoerde microspiegels. Ze verschillen in die zin dat ze vlak zijn, doorlopende elektrodes per spiegelkolom hebben en een grotere spiegel-elektrodeafstand hebben (600nm) en dus een grotere spiegelhoek. Verschillende combinaties van hengsellengtes, spiegelzijdes (nl. 8, 10, 15 en $20\mu\text{m}$) en elektrodeconfiguraties werden gerealiseerd.



Figuur 2.12: Microspiegel van de 11MegaPixel-SiGe-spiegelmatrix [18].

Fabricatieproces Bij het eerste SiGe-ontwerp 'GEMI' werd geen CMOS-schakeling geïntegreerd. Als vervangende of 'dummy'-stapel wordt op een Si-wafer de combinatie van een 1000nm Si-oxide- en een 400nm-SiC-beschermlaag aangebracht [16]. Het SiGe-MEMS-platform biedt de mogelijkheid om elektrodes van twee diktes te kiezen. Om de eerste 'dunne' elektrodel laag te vormen wordt een 400nm dikke SiGe-laag gedeponeerd. Op de daaropvolgende 250nm-Si-oxidelaag wordt het patroon gevormd dat zal worden gebruikt als 'hard' masker (zie Figuur 2.13). Vervolgens wordt daarop een extra 200nm-SiGe-laag gelegd, die de extra dikte zal vormen voor de 'dikke' elektrode. Daarna wordt de vorm van de elektrodes verkregen door beide SiGe-elektrodelagen in één stap te etsen. Het Si-oxide harde masker bepaalt de dunne elektrodes terwijl de lithografiestap de dikke elektrodes definieert. De resist doet dienst als etsstoplaag. Vervolgens wordt een 1200nm dikke Si-oxidelaag gedeponeerd en vlak gemaakt via CMP die net stopt op de dikke SiGe-elektrodel laag. Deze CMP-vervlakking is nodig om correct gecreëerde sacrificiële tussenruimtes te verzekeren, waarvan de diktevariatie enkel afhankelijk is van de volgende aangebrachte 400nm dikke sacrificiële HDP (*High Density Plasma*)-oxidelaag na de CMP-stap. Dit zorgt ervoor dat vlakke spiegels bekomen zullen worden. Het patroon dat vervolgens ingeprent wordt in de sacrificiële laag zorgt voor de toekomstige ankers. Op een wafertemperatuur van $\sim 450^{\circ}\text{C}$ wordt de structuur laag met 330nm geoptimaliseerd poly-SiGe, waarvan 78% Ge, gedeponeerd met behulp van *Chemical Vapor Deposition* (CVD) bovenop een dunne Ti/TiN-adhesielaag. Opnieuw wordt een CMP-stap uitgevoerd om een minimale ruwheid en een maximale reflectiviteit van de spiegels te garanderen. Als afwerking van de microspiegels wordt een SiC-sperlaag en een 30nm-Al-bedeckingslaag aangebracht. Het aluminium bevordert de reflectiviteit. Daarna wordt een Si-oxide hard masker gedeponeerd om vervolgens het patroon van de spiegels in de SiGe/sperlaag/Al/Si-oxide-stapel over te brengen. Als laatste stap worden de spiegels 'vrijgelaten' van de



(a) Deposition of 1000 nm Si-oxide and 400 nm SiC CMOS protection layer

(b) Deposition of thin SiGe electrode layer 400nm + 250 nm HDP Si-oxide hardmask

(c) Patterning of oxide hardmask (wet etch)

(d) Deposition 200 nm CVD SiGe + patterning thin (oxide hardmask) and thick SiGe (resist mask)

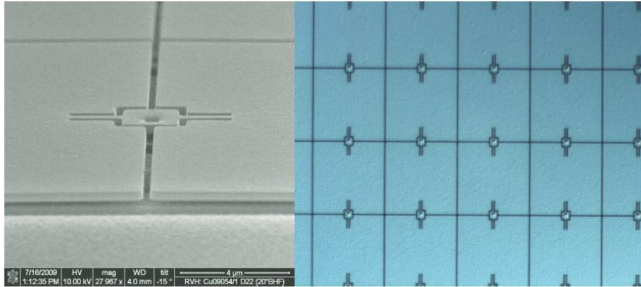
(e) Deposition planarising HDP oxide + CMP with stop on thick SiGe

(f) Deposition of 400 nm sacrificial HDP oxide + sacrificial oxide contact etch

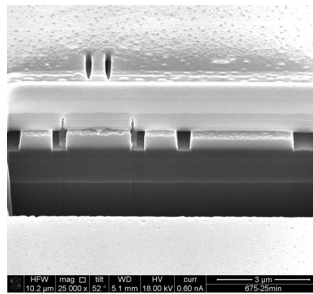
(g) Deposition of Ti/TiN adhesion layer, 300 nm CVD SiGe (after CMP), 5nm SiC, 30 nm Al and a Si-oxide hardmask + structural layer etch

Figuur 2.13: Schematisch overzicht van het SiGe-microspiegelproces voor de dunne filmmodule [16].

Si-oxide of *gereleased* door HF-damp. De microspiegels zijn uiteindelijk afgewerkt en vrij te bewegen bij actuatie. Ze zijn erg vlak en hebben een rekgradiënt onder $9 \cdot 10^{-4}/\mu\text{m}$ (zie Figuur 2.14).



Figuur 2.14: SEM-foto (links) en microscoopfoto (rechts) van gerealiseerde SiGe-microspiegels.



Figuur 2.15: SEM-foto van een SiGe-microspiegeldoorsnede.

Figuur 2.15 laat een doorsnede van een $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ microspiegel zien, gerealiseerd door een FIB (*Focusing Ion Beam*). De gelijkaardige doorsnede van elektrodes, anker en spiegel is te herkennen in Figuur 2.13.

Voor het proces van het tweede opvolgende SiGe-ontwerp 'GEMII' zijn er enkele aanpassingen ingevoerd. De minimale hengselbreedte is $0.3\mu\text{m}$ terwijl dit voor GEMI $0.35\mu\text{m}$ was. Onder de SiC-bescherm laag is er de mogelijkheid om Al-baantjes te definiëren, zodat de interconnectiemogelijkheden aanzienlijk toenemen. Ook is er de optie om een tijdelijke verpakking te voorzien. Die bestaat uit een Si-plaatje dat door een polymeer-ring tijdelijk is 'vastgelijmd' op het substraat. Op die manier worden de spiegels beschermd tegen het koelwater bij het snijden van de *wafer* in afzonderlijke *dies*. Na dit *dicen* worden deze plaatjes verwijderd onder lokale opwarming m.b.v. een *flipchipbonder*. Onderzoek toonde aan dat tijdelijk verpakte microspiegels ongeschonden bleven na dit proces [20, 21]. In Sec-

tie 2.3 bespreken we kort een geoptimaliseerde methode om de tijdelijke verpakking te verwijderen.

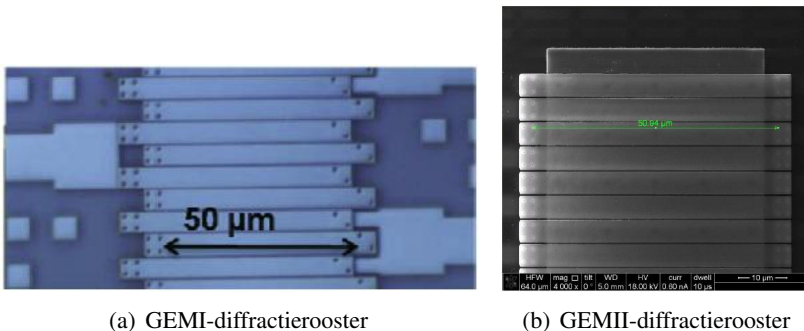
De *bondpads* voor GEMII worden eerst gedefinieerd, daarna pas worden de spiegels geëtsd. Dit is omgekeerd bij GEMI. Daarbij traden echter residu problemen op. Sommige *bondpads* hadden ook last van delaminatie.

Om de *cupping* van de spiegels te optimaliseren, werd een nieuw SiGe-recept ontwikkeld. De SiGe-stapel bestaat uit Ti/TiN + SiGe + SiC + Al, waarbij het groeien van SiGe gebeurt samen met een B_2H_6 stroom aan 90sccm (*standard cubic centimeter per minute*). Een *cupping* van 3nm werd bereikt op testmateriaal. Een CMP-probleem bij het echte proces leidde uiteindelijk tot een slechtere *cupping* van 22nm en een spiegel-elektrodeafstand van 400nm i.p.v. 600nm. Merk op dat de *cupping* bij DMD-microspiegels niet bekend is.

Het onderzoek in dit doctoraat werd uitgevoerd op GEMI- en GEMII-SiGe-microspiegels.

2.2.2.2 Diffractieroosters

Met de GEMI- en GEMII-*processflows* werden naast microspiegels ook diffractieroosters ontworpen, gemaakt en onderzocht door Sukumar Rudra binnen de *Photonics* groep van UGent. Voor deze roosters is vooral de inwendige spanning (best zo veel mogelijk trekspanning) en niet zozeer de spanningsgradiënt belangrijk. Vandaar dat soms andere *processsplits*, zoals het weglaten van de Ti/TiN-laag en het reduceren van de SiGe-dikte, gebruikt werden [16]. Figuur 1.14 toont zulke diffractieve roosters. Meetresultaten staan beschreven in verschillende publicaties [22, 23].



Figuur 2.16: Gerealiseerde SiGe-diffractieroosters [16, 22].

2.2.3 Dikke filmmodule

2.2.3.1 Verpakte accelerometers

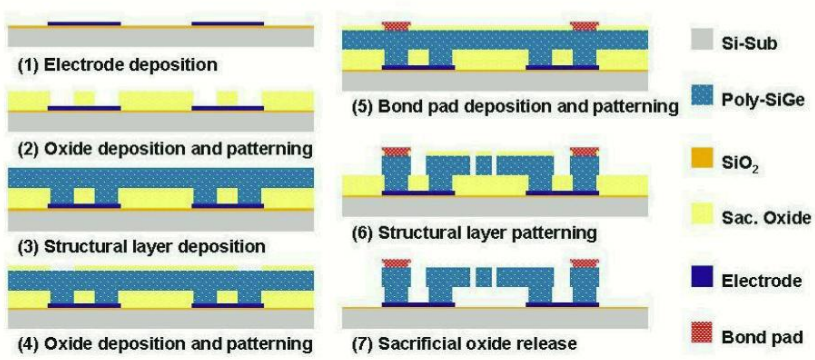
De accelerometers die werden gemaakt met het SiGe-platform zijn van het capacitief differentiële type. Die bieden een hoge gevoeligheid, stabiele DC-karakteristiek, weinig drift, lage vermogensdissipatie en temperatuur-gevoeligheid [16]. Het proces van het GEMI-ontwerp om deze accelerometers op te bouwen wordt weergegeven in Figuur 2.17. Net als bij de dunne filmmodule wordt vertrokken van een siliciumwafer met daarop een Si-oxide- en een SiC-laag als CMOS-dummylaag. De SiC-'passivatie'-laag beschermt de Si-oxide bij de latere *release*stap. Met behulp van CVD wordt de 400nm-elektrodelaaag gedeponereerd en krijgt die via lithografie het gewenste patroon. Een eerste CMP-stap wordt uitgevoerd nadat Si-oxide werd aangebracht. Het vervlakken wordt gestopt net tegen de elektrodelaaag. Vervolgens wordt de dikke sacrificiële laag van $3\mu\text{m}$ aangebracht. Hierin worden dan openingen gemaakt voor de ankers alvorens de $4\mu\text{m}$ dikke SiGe-structuurlaag wordt geplaatst. Het vormen van de structuurlaag is een combinatie van CVD-poly-SiGe met 75% Ge en PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) poly-SiGe met 55% Ge. Vier lagen van $1\mu\text{m}$ worden zo gestapeld. Op deze manier blijven excellente elektrische en mechanische eigenschappen behouden met een extreem kleine rek-gradiënt. Een 1mm lange cantilever vertoont een afbuiging van minder dan $5\mu\text{m}$ [24]. Een tweede CMP-stap vervlakt de structuurlaag en reduceert op die manier de ruwheid. Dan wordt een extra oxidelaag gedeponereerd voor de openingen van de metalen *bondpads*. De depositie van TaN/Al, samen met het aanbrengen van het patroon, definieert de *bondpads*. Finaal wordt dit patroon voor de Si-oxide- en SiGe-structuurlaag overgebracht om dan te eindigen met een *release* van de hele structuur met HF.

Een in-het-vlak en een uit-het-vlak capacitieve accelerometer werden met dit platform gecreëerd en onderzocht door *Lianggong Wen* van K.U.Leuven (Figuur 2.18(a) en Figuur 2.18(b)). Meetresultaten van beide accelerometers zijn beschreven in de publicaties [25] en [26].

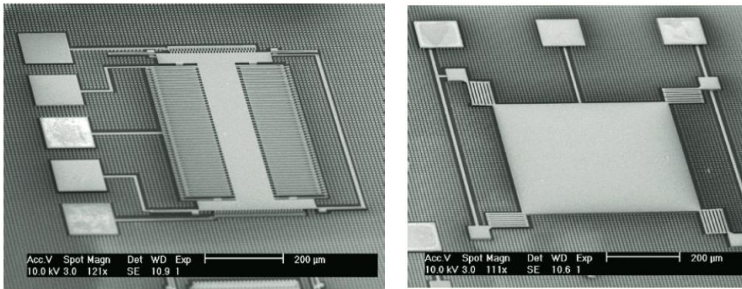
Voor het GEMII-ontwerp wordt een permanente verpakking voorzien. Ook deze verpakte accelerometers zijn gemeten en de resultaten gepubliceerd [27, 28].

2.3 Verwijderen tijdelijke verpakking

In het Gemini-project werd de mogelijkheid onderzocht om de SiGe-chips van een tijdelijke verpakking te voorzien. Het verpakken van de MEMS-



Figuur 2.17: Schematisch overzicht van het SiGe-GEMI-accelerometerproces [16].



(a) In-het-vlak accelerometer [25]

(b) Uit-het-vlak accelerometer [26]

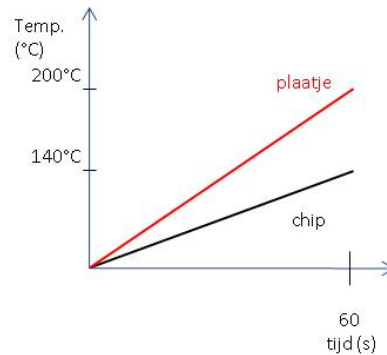
Figuur 2.18: Gerealiseerde SiGe-accelerometers.

dies gebeurt door middel van een Si-plaatje dat op een *Unity 2203P*-lijmring rondom de MEMS-structuren wordt gekleefd m.b.v. een *flipchipbonder*. Omdat deze *cap* tijdelijk is, wordt ze na het *dicen* er weer af gehaald met dezelfde *flipchipbonder*. In imec werd een methode ontwikkeld om dit debonden automatisch uit te voeren met een ingesteld z- en drukprofiel van de z-arm van het toestel [20, 21]. Het *decappen* duurt ongeveer 50 seconden.

Samen met collega *Sukumar Rudra* werd een optimalisatie van deze methode ontwikkeld. De onbedoelde 'trek'-mogelijkheid van de drukarm van een manuele *flipchipbonder* van UGent (zie Figuur 2.19(a)) wordt hier toe benut. Het vacuüm houdt de *cap* en de chip vast aan respectievelijk de grondplaat en de manuele z-arm van de *flipchipbonder*. Ze warmen op volgens het temperatuurprofiel uit Figuur 2.19(b). Het aanbrengen van druk valt te mijden doordat de smeltende en vloeïende lijm makkelijker in contact zal komen met de microspiegels. Ook kan het Si-plaatje op de spiegels worden gedrukt. Een te lang opwarmen dienen we te omzeilen opdat de vloeïende lijm niet op de MEMS zou terechtkomen zoals in Figuur 2.20(a). Via de 'trekmethode' warmt de lijmring zolang op tot de *cap* loskomt van de chip. Zo bereikten we ongeschonden MEMS na een optimale *decaptijd* van 40 seconden (zie Figuur 2.20(b)).



(a) Manuele *flipchipbonder* (UGent)

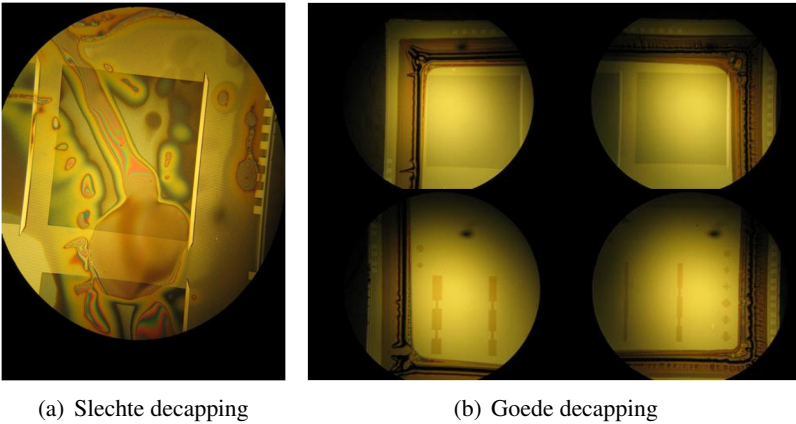


(b) temperatuurprofiel

Figuur 2.19: Optimale *decapmethode*.

2.4 Conclusie

Bij oppervlakte-*micromachining*-technologieën reduceert de MEMS-CMOS monolithische benadering de parasitaire effecten door de onderlin-



Figuur 2.20: Vergelijking goed en fout decappen.

ge interconnecties. MEMS-na-CMOS maakt een onafhankelijk ontwerp van MEMS en CMOS mogelijk en bereikt zo de meest compacte vorm. Standaard IC's of *updates* ervan blijven toepasbaar. Hierbij is het temperatuurbudget echter beperkt tot 450°C of 520°C, afhankelijk van de specifieke metallisatie en ontwerpeisen. De ideale kandidaat om als MEMS-structuurmateriaal te gebruiken is polykristallijn SiGe. Ze heeft vergelijkbare elektrische en mechanische eigenschappen als Si. Terzelfdertijd leidt Ge tot een gereduceerde depositietemperatuur. Enkele eerste realisaties zoals een z-asgyroscop en een 11MegaPixel-microspiegelmatrix voor maskerloze lithografie bleken veelbelovend. In het kader van het IWT-SBO-project Gemini (*Generic Electronics and Microsystems INtegration Initiative*) werden drie demonstratoren ontwikkeld en onderzocht om de generische aard van het monolithische SiGe-MEMS-op-CMOS platform aan te tonen. De gerealiseerde diffractiematrices (*Photonics*, UGent) en accelerometers (K.U.Leuven) werden kort toegelicht. Een methode die de *decaptijd* voor de tijdelijke verpakking verder reduceert van 50s tot 40s werd door ons in samenwerking met *Sukumar Rudra* ontwikkeld. Het doctoraatswerk in de volgende hoofdstukken is gebaseerd op metingen van de derde demonstrator, SiGe-microspiegels.

Referenties

- [1] Stephen D. Senturia. *Microsystem Design*. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [2] D. Panescu. *MEMS in medicine and biology*. Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE, 25:19–28, 2006.
- [3] L. Ristic and M. Shah. *Trends in MEMS Technology*. In WESCON/96, pages 64 – 72, Anaheim, CA, USA, 1996.
- [4] C.-H. Ji, M. Choi, S.-C. Kim, K.-C. Song, J.-U. Bu, and H.-J. Nam. *Electromagnetic Two-Dimensional Scanner Using Radial Magnetic Field*. Journal of Microelectromechanical Systems, 16(4):989–996, 2007.
- [5] A. M. Madni and L. A. Wan. *Microelectromechanical systems (MEMS): an overview of current state-of-the-art*. In Aerospace Conference, 1998. Proceedings., IEEE, pages 421–427, Snowmass at Aspen, CO, USA, 1998.
- [6] P. F. Van Kessel, L. J. Hornbeck, R. E. Meier, and M. R. Douglass. *A MEMS-Based Projection Display*. Proceedings of the IEEE, 86(8):1687–1704, 1998.
- [7] L. J. Hornbeck. *Digital Light Processing and MEMS: Timely Convergence for a Bright Future (Invited Plenary Paper)*. Proceedings of the SPIE: Micromachining and Microfabrication Process Technology, 2639:2–26, 1995.
- [8] V. Rajamaran, K. A. A. Makinwa, and P. J. French. *DRIE and Bonding Assisted Low Cost MEMS Processing of In-plane HAR Inertial Sensors*. In ASDAM 2008, The Seventh International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems, pages 327–330, Smolenice Castle, Slovakia, 2008.
- [9] L. Jian, B. Loechel, H.-U. Scheunemann, M. Bednarzik, Y. M. Desta, and J. Goettert. *Fabrication of Ultra Thick, Ultra High Aspect Ratio Microcomponents by Deep and Ultra Deep X-ray Lithography*. In Proceedings of the International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems (ICMENS'03), pages 10–14, Banff, Alberta, Canada, 2003.
- [10] A. Witvrouw. *CMOS-MEMS integration today and tomorrow*. SCRIPTA MATERIALIA, 59:945–949, 2008.

- [11] A. Witvrouw. *CMOS-MEMS integration: Why, how and what?* In IEEE/ACM International Conference on Computer Aided Digest of Technical Papers, Vols 1 and 2, pages 80–81, San Jose, CA, USA, 2006.
- [12] S. Sedky, A. Witvrouw, and K. Baert. *Poly SiGe, a promising material for MEMS monolithic integration with the driving electronics*. Sensors and Actuators A: Physical, 97-98:503–511, 2002.
- [13] L. Haspeslagh, J. De Coster, O. V. Pedreira, I. De Wolf, B. Du Bois, A. Verbist, R. Van Hoof, M. Willegems, S. Locorotondo, G. Bryce, J. Vaes, B. van Drienuizen, and A. Witvrouw. *Highly reliable CMOS-integrated 11 MPixel SiGe-based micro-mirror arrays for high-end industrial applications*. In IEDM 2008. IEEE International Electron Devices Meeting, pages 4–7, San Francisco, CA, USA, 2008.
- [14] Frank Niklaus. *Adhesive Wafer Bonding for Microelectronic and Microelectromechanical Systems*. Universitetservice US AB, Stockholm, 2002.
- [15] M. Gromova, A. Mehta, K. Baert, and A. Witvrouw. *Characterization and strain gradient optimization of PECVD poly-SiGe layers for MEMS applications*. In SENSORS AND ACTUATORS A-PHYSICA, volume 130, pages 403–410, Hyogo, Japan, 2006.
- [16] A. Witvrouw, R. Van Hoof, G. Bryce, B. Du Bois, A. Verbist, S. Severi, L. Haspeslagh, H. Osman, J. De Coster, L. Wen, R. Puers, R. Beernaert, H. De Smet, S. Rudra, and D. Van Thourhout. *SiGe Technology: a Platform Technology Enabling Different Demonstrators*. ECS Transactions, 33:799–812, 2010.
- [17] A. Scheurle, T. Fuchs, K. Kehr, C. Leinenbach, S. Kronmüller, A. Arias, J. Ceballos, M. A. Lagos, J. M. Mora, J. M. Munoz, A. Ragel, J. Ramos, S. Van Aerde, J. Spengler, A. Mehta, A. Verbist, B. Du Bois, and A. Witvrouw. *A 10 μm thick Poly-SiGe gyroscope processed above 0.35 μm CMOS*. In PROCEEDINGS OF THE IEEE TWENTIETH ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS, pages 230–233, Kobe, Japan, 2007.
- [18] A. Witvrouw, L. Haspeslagh, O. V. Pedreira, J. De Coster, I. De Wolf, H. A. C. Tilmans, I. Bearda, B. Schlattmann, M. Van Bommel, M.-C. de Nooijer, P. H. C. Magnée, E. J. Lous, M. Hagting,

- J. Lauria, R. Vanneer, and B. van Driehuisen. *11-Megapixel CMOS-Integrated SiGe Micromirror Arrays for High-End Applications*. JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, 19:202–214, 2010.
- [19] IWT nr 60046. '*Generic Electronics and Microsystems INtegration Initiative*', 2007-2011.
- [20] L. Bogaerts, A. Phommahaxay, C. Gerets, P. Jaenen, R. Van Hoof, S. Severi, J. De Coster, R. Beernaert, R. Sukumar, P. Soussan, and A. Witvrouw. *Temporary 0-level MEMS packaging using a heat decomposable sealing ring*. In EUROSENSORS XXV, Athene, Griekenland, 2011.
- [21] L. Bogaerts, A. Phommahaxay, C. Gerets, P. Jaenen, R. Van Hoof, S. Severi, M. Van De Peer, J. De Coster, R. Beernaert, S. Rudra, A. La Manna, P. Soussan, and A. Witvrouw. *Temporary protective packaging for optical MEMS*. In IMAPS 2011, 44th International Symposium on Microelectronics, Long Beach, CA, USA, 2011.
- [22] S. Rudra, J. Roels, G. Bryce, L. Haspelslagh, A. Witvrouw, and D. Van Thourhout. *SiGe based Grating Light Valves: A leap towards monolithic integration of MOEMS*. Microelectronic Engineering, 87:1195–119, 2010.
- [23] S. Rudra, J. De Coster, R. Van Hoof, A. Witvrouw, and D. Van Thourhout. *Static and dynamic characterization of poly-SiGe Grating Light Valves*. In IEEE Optical MEMS and Nanophotonics 2011, Istanbul, Turkije, 2011.
- [24] G. Claes, G. Van Barel, R. Van Hoof, B. Du Bois, M. Gromova, A. Verbist, T. Van der Donck, S. Decoutere, J.-P. Celis, and A. Witvrouw. *Stacked boron doped polycrystalline silicon-germanium layers: an excellent MEMS structural material*. In MRS Spring 2008 Proc., volume 1033, pages J05–02, Strasbourg, France, 2008.
- [25] L. Wen, K. Wouters, L. Haspelslagh, A. Witvrouw, and R. Puers. *A Comb Based In-plane SiGe Capacitive Accelerometer for Above-IC Integration*. In Proceedings of the MicroMechanics Europe 2010. 21st MicroMechanics Europe, volume C11, Enschede, Nederland, 2010.
- [26] L. Wen, L. Haspelslagh, J. De Coster, A. Witvrouw, and R. Puers. *Design and characterization of a CMOS compatible poly-SiGe low g capacitive accelerometer*. In EUROSENSOR XXIV CONFERENCE, volume 5, pages 742–745, Linz, Oostenrijk, 2010.

- [27] B. Guo, L. Wen, P. Helin, G. Claes, A. Verbist, R. Van Hoof, B. Du Bois, J. De Coster, I. De Wolf, A. Hadi Shahar, Y. Li, H. Cui, M. Lux, G. Vereecke, H. A. C. Tilmans, L. Haspeslagh, S. Decoutere, H. Osman, R. Puers, S. Severi, and A. Witvrouw. *Above-IC generic poly-SiGe thin film wafer level packaging and MEM device technology: application to accelerometers*. In Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2011 IEEE 24th International Conference on, pages 352–355, Cancun, Mexico, 2011.
- [28] L. Wen, B. Guo, L. Haspeslagh, S. Severi, A. Witvrouw, and R. Puers. *Thin film encapsulated SiGe accelerometer for mems above IC integration*. In Transducers' 11, Peking, China, 2011.

3

'2x1'-SiGe-microspiegels

3.1 Inleiding

Om de SiGe-demonstratoren te realiseren werden voor dit onderzoek verschillende microspiegelmatrices ontwikkeld voor het ontwerp 'GEMI' en 'GEMII'. In Subsectie 2.2.2.1 werden deze twee ontwerpen al besproken. De layout van deze twee individuele chips of *dies* werd ontworpen met behulp van het elektronisch ontwerpprogramma *Cadence*. Figuur 3.1 toont het GEMI- en GEMII-ontwerp in *Cadence* samen met een foto van de uiteindelijke realisatie ervan.

In beide ontwerpen werden basismicrospiegels geïmplementeerd. Deze '2x1'-SiGe-microspiegels bevatten een enkele actuatie- en landingelektrode aan elke zijde. In Sectie 3.2 wordt verder ingegaan op de structuur van deze spiegel, samen met de verschillende ontworpen spiegelmatrices. In dit hoofdstuk gaan we op zoek naar het behalen van elektrische CMOS-compatibiliteit bij '2x1'-SiGe-microspiegels. Om een idee te vormen van het gedrag van de verschillende ontworpen microspiegels, gaan we dieper in op het fenomeen waarbij de aanstuurspanning hoog genoeg is zodat de spiegel inklapt op de landingelektrode. Dit komt overeen met de *pull-in*-spanning. Indien we terug de spanning laten dalen, wordt de spiegel bij een bepaalde spanningswaarde terug losgelaten. Dit is de *pull-out*-spanning. Deze geven een idee voor de werkspanning van de microspiegels en dus de elektrische CMOS-compatibiliteit, indien we de spiegels willen laten in-

klappen op de landingelektrodes en willen aansturen via PWM. Via de theorie, simulaties en experimentele LDV-metingen bespreken we in Sectie 3.3 de verschillende spiegelparameters (zoals spiegelgrootte, hengsellengte en hengselbreedte) die hierop invloed uitoefenen. Er wordt tegelijkertijd aandacht besteed aan de maximale spiegelhoek. Ook vermelden we een aangepaste graduele elektrodeconfiguratie die de *pull-in*- en *pull-out*-spanning verder kan verlagen. We besteden ook aandacht aan de mate waarin deze spanningen voor verschillende microspiegels uniform zijn over eenzelfde gerealiseerde SiGe-spiegelmatrix.

Hiernaast wordt de dynamiek van de microspiegels gekarakteriseerd in Sectie 3.4. De resonantiefrequentie en het schakelgedrag komen aan bod. Tijdens dit onderzoek doken enkele ongewenste effecten op. Fenomenen als pistoneffect, stictie, spiegelschade en overspraak worden in Sectie 3.5 behandeld. Tenslotte lichten we in Sectie 3.6 de reflectiviteit voor deze ontwikkelde SiGe-microspiegels toe. Sectie 3.7 illustreert de werking van de '2x1'-SiGe-microspiegels via een demo-matrix.

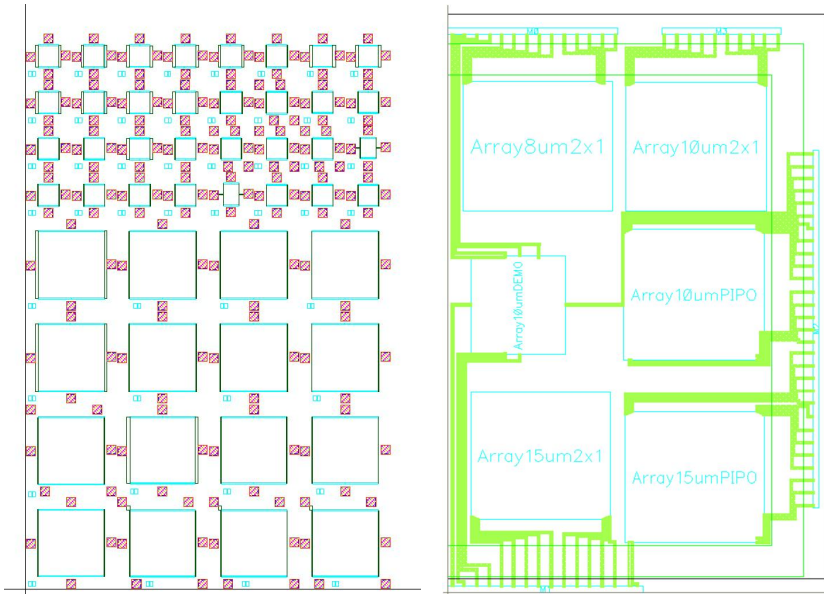
Indien niet anders verwezen, werden alle metingen in dit hoofdstuk door ons uitgevoerd.

3.2 '2x1'-microspiegel

De eenvoudigste opbouw van een microspiegel of de hiergenoemde '2x1'-microspiegel is een uit één laag gevormde roteerbare spiegel, waarvan de uitlopers van de spiegel de hengsels vormen. Dit ontwerp is gebaseerd op eerder gerealiseerde microspiegels zoals in Figuur 2.12 (zie Sectie 2.2.2.1). Via vast opgestelde pontons houden ze de spiegel 'zwevend' boven het substraat. Eén elektrode onder elke helft van de spiegel (vandaar '2x1') zorgt voor de elektrostatische aantrekking van de spiegel aan dezelfde kant van die elektrode. Verder zijn er nog twee smalle elektrodes voorzien naast de actuatielektrodes om de spiegel veilig te laten landen. Deze elektrodes worden de landingelektrodes genoemd. Om geen interactie te geven staan beiden op dezelfde elektrische spanning als de spiegel. Figuur 3.2 geeft de opbouw van de '2x1'-microspiegel weer.

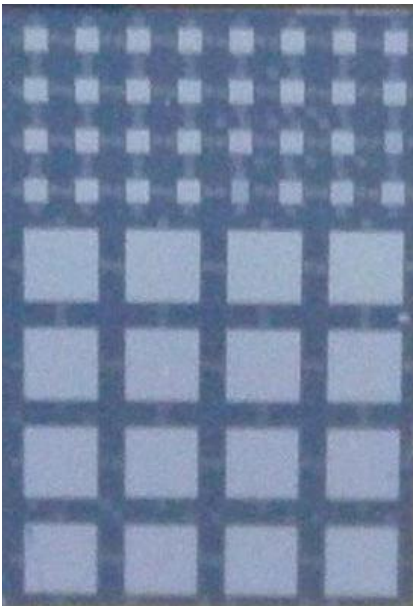
Om spanning aan te brengen op de elektrodes worden deze geconnecteerd met *bondpads* rondom de spiegelmatrix zoals bij de GEMI-spiegelmatrix in Figuur 3.3(a). Bij de GEMII-spiegelmatrices zijn de *bondpads* verder weg van de matrix gepositioneerd. Ze omringen de lijmring die nodig is voor de tijdelijke verpakking.

Elke '2x1'-kolom van spiegels is onderling geconnecteerd via doorverbonden elektrodes. Figuur 3.3(b) illustreert dit voor een GEMI-kolomsegment waar drie spiegels ontbreken. De GEMII-'2x1'-matrices

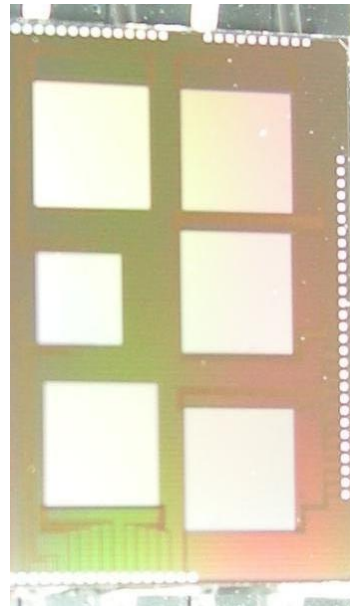


(a) GEMI-ontwerp

(b) GEMII-ontwerp

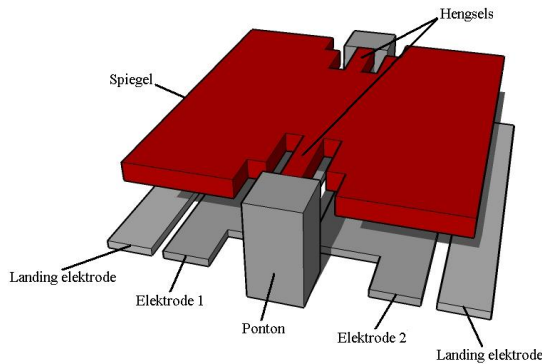


(c) GEMI-realiserie



(d) GEMII-realiserie

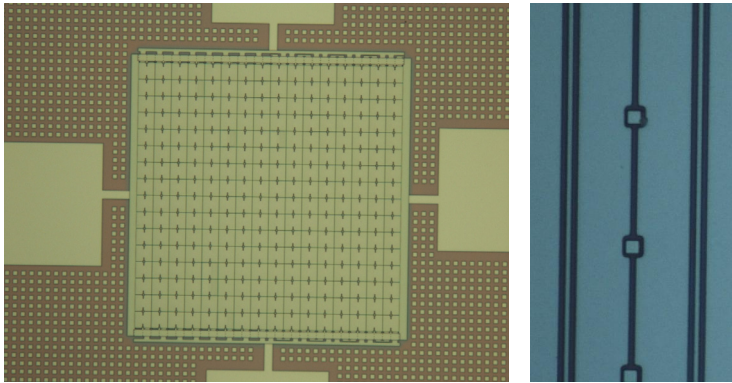
Figuur 3.1: Cadence-ontwerp en realisatie van GEMI en GEMII.



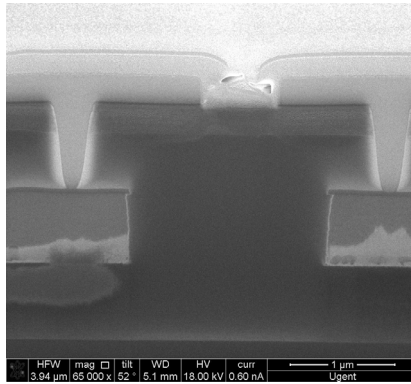
Figuur 3.2: Het '2x1'-microspiegelmodel.

hebben extra parallel onderliggende metaalbaantjes per elektrodelijn onderling verbonden met via's. Figuur 3.3(c) illustreert deze interconnectie van twee elektrodes met onderliggende metaalbaantjes a.d.h.v. een FIB-doorsnede. Per kolom krijgen de spiegels bijgevolg dezelfde actuatie. Bij een GEMI-'2x1'-matrix bestaat de ene helft uit gelijk aangestuurde kolommen, de andere helft uit geschranke kolommen, i.e. per kolom worden de twee actuatie-elektrodespanningen telkens omgewisseld. Voor de GEMII-spiegelmatrices zijn er per helft vier afwisselende verschillende elektrodelijnen in plaats van twee bij GEMI. Zo zijn er meer elektrisch onafhankelijke spiegelreeksen.

De *dies* van het GEMI- en GEMII-ontwerp bestaan uit verschillende microspiegelmatrices. Voor de GEMI-chip kunnen we twee matrixgroottes onderscheiden. De 'kleine' matrix valt samen met de omringende *bond-pads* binnen een afmeting van 0.75mm bij 0.75mm. De 'grote' matrices beslaan 1.5mm bij 1.5mm. Per matrix zijn de microspiegels identiek. Tussen de matrices onderling variëren de spiegels in spiegelzijde z ($8\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$ en $20\mu\text{m}$) en hengsellengte h . De hengselbreedte voor alle GEMI-spiegels is $0.35\mu\text{m}$. De GEMII-spiegels hebben een smallere hengselbreedte, namelijk $0.3\mu\text{m}$. In dit hoofdstuk zullen we gebruik maken van de 'z:h'-notatie om aan te duiden welke '2x1'-microspiegel het betreft. Een $10\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMII-spiegel bijvoorbeeld is een spiegel van het GEMII-ontwerp met een zijde van $10\mu\text{m}$, hengsels met een lengte $3\mu\text{m}$ en breedte $0.3\mu\text{m}$. Naast het basismodel of '2x1'-model dat we toelichten in dit hoofdstuk, werd ook een zogenaamd 'PIPO' (*Pull-In Pull-Out*)-spiegelmodel ontworpen. In Hoofdstuk 4 wordt deze originele uitvinding besproken. Tabel 3.1 geeft een overzicht van verschillende '2x1'-GEMI-microspiegelmatrices.



(a) GEMI-20 μ -spiegelmatrix met omliggende *bond-* (b) Kolominterconnectie van elektrodes
pads



(c) GEMII-via-interconnectie van elektrode- en metaallaag (FIB-doorsnede)

Figuur 3.3: '2x1'-microspiegelrealisaties voor GEMI en GEMII.

ontwerp	Spiegelzijde z [μm]	Hengsellenge h [μm]
GEMI	8	1
GEMI	8	1.5
GEMI	8	2
GEMI	8	2.5
GEMI	10	2.5
GEMI	10	3
GEMI	10	3.5
GEMI	15	2
GEMI	15	3
GEMI	15	4
GEMI	20	2
GEMI	20	3
GEMI	20	4
GEMII	8	2.5
GEMII	10	3
GEMII	15	4

Tabel 3.1: Overzicht GEMI- en GEMII-microspiegelmatrices

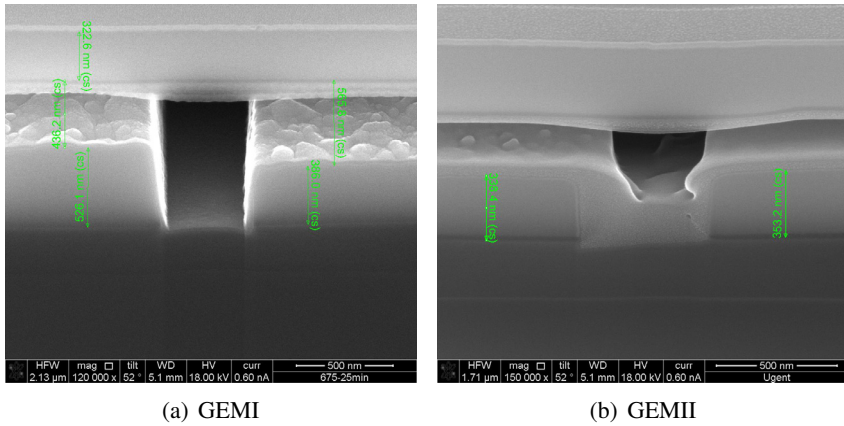
GEMII bevat zes microspiegelmatrices waaronder drie volgens het '2x1'-model. De hengselbreedte voor deze spiegels bedraagt $0.3\mu\text{m}$. De andere dimensies ervan staan vermeld in Tabel 3.1.

Ter verificatie werd een FIB-doorsnede uitgevoerd op zowel een GEMI- als GEMII-'PIPO'-spiegel. Deze bevat namelijk zowel dunne als dikke onderliggende elektrodes. Voor de GEMI-spiegel vallen de gemeten elektrodehoogtes en tussenruimte g (gemeten: $0.57\mu\text{m}$) binnen de specificaties. De GEMII-doorsnede brengt echter aan het licht dat het verschil tussen dunne en dikke elektrode helaas verwaarloosbaar is. Aangenomen wordt dat door een CMP-probleem de dikke elektrodelaag te ver gepolijst werd en bijgevolg de maximale spiegel-elektrodeafstand van 600nm herleid werd tot $\sim 400\text{nm}$. Figuur 3.4 toont de FIB-doorsnedes voor het GEMI- en GEMII-ontwerp, waarbij de dunne en dikke elektrode respectievelijk rechts en links staan afgebeeld.

3.3 Pull-in en pull-out

3.3.1 Inleiding

Het actueren van een microspiegel gebeurt door een spanning aan te leggen over de spiegel en een onderliggende elektrode. Het aangelegd elektrisch veld zorgt voor het aantrekken van de spiegel en brengt een elektrostatistische torsie teweeg in de hengsels. In de literatuur [1] wordt een benaderende uitdrukking voor deze elektrostatistische torsie T_{elekt} gegeven (Zie vergelijking 3.1). Hierbij staat dF/dA voor de elektrostatistische kracht per eenheid



(a) GEMI

(b) GEMII

Figuur 3.4: Vergelijking tussenruimte en elektrodehoogtes voor GEMI en GEMII. Op beide doorsnedes: spiegel (bovenaan), dunne elektrode (rechts) en dikke elektrode (links).

oppervlakte uitgeoefend op een elementair oppervlakje dA van de spiegel. De afstand van dit oppervlakje tot de symmetrieas van de spiegel wordt gedefinieerd als x . De totale T_{elekt} van vergelijking 3.3 wordt bekomen na integratie over de hele actieve spiegeloppervlakte [2].

$$T_{elekt} = \int x(dF/dA)dA \quad (3.1)$$

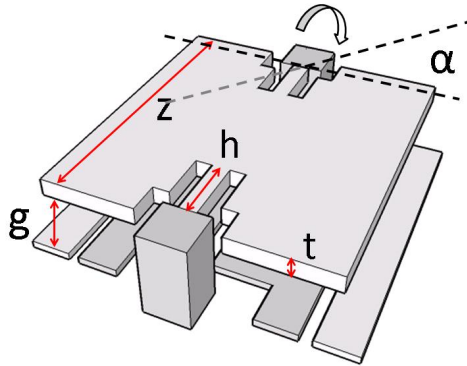
dF/dA kan berekend worden via:

$$dF/dA = (1/2)\epsilon_0\epsilon_r(\Delta V/\Delta Z)^2 \quad (3.2)$$

$$T_{elekt} = \frac{\epsilon_0\epsilon_r V^2 w}{2\alpha^2} \left(\frac{l \sin\alpha}{g - l \sin\alpha} + \ln \left(1 - \frac{l \sin\alpha}{g} \right) \right) \quad (3.3)$$

ΔV is het spanningsverschil tussen de spiegel en de actuerende elektrode, ΔZ is de afstand van het elementair oppervlakje dA tot de elektrode, ϵ_0 is de elektrische veldconstante en ϵ_r de relatieve permittiviteit. In vergelijking 3.3 wordt gebruik gemaakt van de spiegellengte l en spiegelbreedte w [2]. In ons geval zijn deze twee parameters gelijk aan de spiegellengte z . De tussenruimte g samen met de andere dimensieparameters zijn aangeduid in Figuur 3.5.

Door het aanleggen van deze spanning wordt de spiegel elektrostatisch aangetrokken. De mechanische reactie van de hengsels op de bekomen



Figuur 3.5: Dimensieparameters voor de '2x1'-microspiegel.

elektrostatistische torsie T_{elekt} is de mechanische torsie T_{mech} . Deze is lineair afhankelijk van de spiegelhoek α met k_α de veertorsieconstante (zie vergelijking 3.4). Bij een statisch evenwicht is de elektrostatistische torsie T_{elekt} gelijk aan de mechanische torsie T_{mech} (vergelijking 3.5). Een uitdrukking voor de veertorsieconstante wordt gegeven in vergelijking 3.6 [3]. Hierbij staat G voor de schuifmodulus van SiGe (55.3GPa) en t voor de spiegel dikte.

$$T_{mech} = k_\alpha \cdot \alpha \quad (3.4)$$

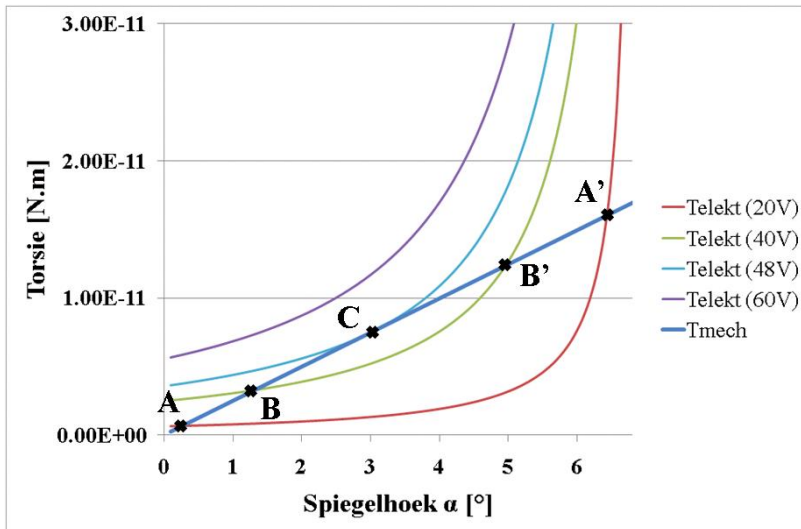
$$T_{mech} = T_{elekt} \quad (3.5)$$

$$k_\alpha = \frac{Gwt^3}{8l} \left[\frac{16}{3} - 3.36 \frac{t}{w} \left(1 - \frac{t^4}{12w^4} \right) \right] \quad (3.6)$$

Deze uitdrukkingen stellen ons in staat een theoretische voorspelling te maken van het gedrag van onze gerealiseerde SiGe microspiegels. Figuur 3.6 toont enerzijds T_{mech} en anderzijds T_{elekt} voor verschillende spanningswaarden (20, 40, 48 en 60V), allen als functie van de spiegelhoek α voor een $10\mu\text{m}:2.5\mu\text{m}$ microspiegel. Voor lagere spanningswaarden snijdt T_{elekt} de curve van T_{mech} in twee punten. Dit betekent dat er twee oplossingen bestaan, bijvoorbeeld punten A en A' voor $V = 20\text{V}$ of B en B' voor $V = 40\text{V}$. A en B vormen stabiele oplossingen en komen overeen met de spiegelhoek naar dewelke de spiegel als eindoplossing roteert. Immers, indien t.o.v. de punten A en B de spiegelhoek iets kleiner is dan de overeenkomstige hoek voor resp. punten A en B, is de elektrostatistische torsie groter dan de mechanische torsie. Bijgevolg zal de spiegel terug roteren richting

het stabiel punt. Wanneer de spiegelhoek iets groter is, is de mechanische torsie nu groter dan de elektrostatische, met als gevolg dat de spiegelhoek zal verkleinen en de spiegel terug richting het betreffende stabiel punt zal bewegen.

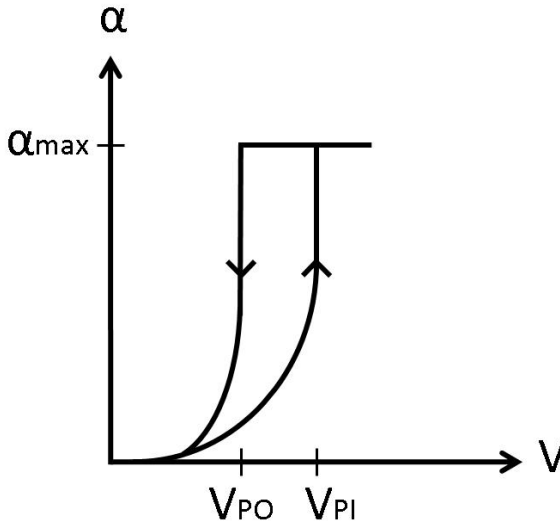
Voor een welbepaalde spanning, in dit geval $V = 48\text{V}$, vallen de twee punten samen. Voor hogere spanningen is de elektrostatische torsie steeds hoger dan de mechanische torsie. Dit impliceert dat de elektrostatische aantrekking van de spiegel het wint van de mechanische reactiekracht. De spiegel klappt in naar de actuatie-elektrode toe tot de meest uiterste positie, i.e. op de landingelektrode. Dit komt overeen met de maximale spiegelhoek α_{max} (zie Figuur 3.7). De spanning waarbij dit inklappen gebeurt noemen we de *pull-in-spanning* V_{PI} (*pull in*: inklappen). Ter illustratie staan in Figuur 3.8 zulke ingeklapte microspiegels afgebeeld.



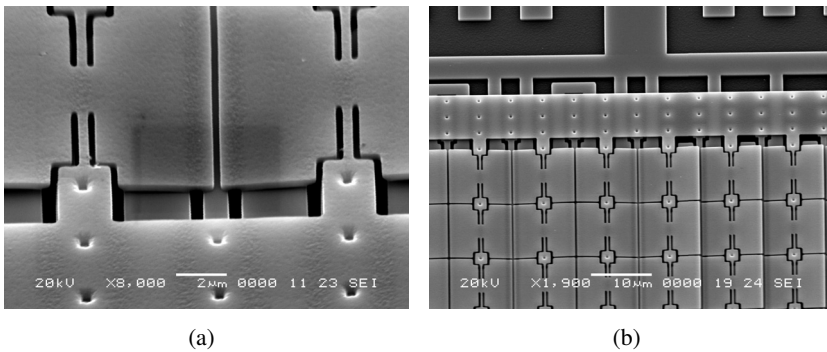
Figuur 3.6: Theoretische torsies uitgezet ten opzichte van spiegelhoek α .

Wanneer we vervolgens de spanning terug laten dalen, wint bij een bepaalde spanning de mechanische herstelkracht het terug van de elektrostatische aantrekking. De spiegel wordt hierbij losgelaten van de landingelektrode. De spanning waarbij het loslaten gebeurt is niet gelijk aan V_{PI} . Immers, indien we de situatie $V = 48\text{V}$ beschouwen, is voor de spiegelhoek $\alpha_{max} = 6.8^\circ$ (maximale hoek van $10\mu\text{m}$ -microspiegels) de elektrostatische torsie nog steeds groter dan de mechanische torsie. Bij het verder verlagen van de spanning, komt de spiegelhoek voor een bepaalde spanningswaarde overeen met een snijpunt van de twee torsiecurves. Wanneer de spiegelhoek iets kleiner is dan die overeenkomstig het snijpunt, is de mechanische

torsie terug groter dan de mechanische torsie. Bijgevolg wordt de spiegel losgelaten van de ingeklapte toestand. De overeenkomstige spanning noemen we de *pull-out*-spanning V_{PO} . Het gedrag van de spiegel volgt een hysteresiscurve zoals in Figuur 3.7 weergegeven [1, 3, 4].



Figuur 3.7: Spiegelhoek α in functie van de actuatiespanning V tussen de spiegel en één onderliggende elektrode (schematisch).



Figuur 3.8: Ingeklapte microspiegels van GEMI-10 μ m-spiegelmatrix.

Op basis van vergelijking 3.6 werden de theoretische k_α verkregen voor verschillende GEMI- en GEMII-microspiegelhengsellengtes. Ze staan samengevat in Tabel 3.2. Hoe langer het hengsel is, des te elastischer en kleiner de veertorsieconstante k_α . Kleinere k_α voor GEMII-spiegelmodellen

h [μm]	$k_{\alpha,GEMI}$ [$N.m/mrad$]	$k_{\alpha,GEMI}$ [$N.m/mrad$]
2.0	$1.78 \cdot 10^{-10}$	$1.57 \cdot 10^{-10}$
2.5	$1.43 \cdot 10^{-10}$	$1.26 \cdot 10^{-10}$
3.0	$1.19 \cdot 10^{-10}$	$1.05 \cdot 10^{-10}$
3.5	$1.02 \cdot 10^{-10}$	$0.90 \cdot 10^{-10}$
4.0	$0.89 \cdot 10^{-10}$	$0.79 \cdot 10^{-10}$

Tabel 3.2: Theoretische k_{α} in functie van de hengsellengte h .

	SiGe	SiC	Al
Elasticiteitsmodulus E [GPa]	135	410	77
Poisson-factor ν [-]	0.22	0.14	0.3
Massadichtheid δ [kg/m^3]	4200	3210	2300

Tabel 3.3: Fysische eigenschappen van SiGe, SiC en Al zoals aangewend bij de simulaties.

zijn te verklaren door de kleinere hengselbreedte $0.3\mu\text{m}$ voor deze spiegels.

Tabel 3.4 lijst de theoretische $V_{PI,TH}$ op voor verschillende spiegels. Deze geven ons een ruwe schatting over het gedrag van verschillende spiegelmodellen. Hoe groter de spiegels en zo ook het spiegeloppervlak, des te sterker de elektrostatische aantrekking bij dezelfde actuatiespanning. De *pull-in*-spanning daalt bijgevolg. Ook bij langere hengsels en dus een minder stugge rotatie voor gelijke spiegelgrootte, daalt de verwachte $V_{PI,TH}$.

3.3.2 Simulatie

In de literatuur zijn er verschillende theoretische benaderingen voor de *pull-in*-spanning te vinden. Een meer diepgaande manier om het gedrag van microspiegels te bestuderen is het simuleren met behulp van programma's als *Comsol Multiphysics* [5] en *Coventor* [6]. Deze maken gebruik van de eindige elementenmethode om de stationaire toestand van de gemodelleerde microspiegel te berekenen onder invloed van de opgedrongen spanningen. Een extra verbetering op de theoretische berekeningen is dat we nu wel rekening houden met de gelaagdheid van de microspiegels. In plaats van een eenvoudige Si-laag wordt nu de (SiGe+SiC+Al)-spiegelstapel in rekening gebracht. We gingen uit van de fysische eigenschappen vermeld in Tabel 3.3.

De simulatieprogramma's stellen ons in staat V_{PI} te vinden voor verschillende microspiegels. In eerste instantie werd m.b.v. *Comsol* de gesimuleerde *pull-in*-spanning $V_{PI,CS}$ bepaald. In een latere fase van het onderzoek werden *Coventor*-simulaties uitgevoerd. Deze leveren ons naast de *pull-in*-spanning $V_{PI,CV}$ ook de *pull-out*-spanning $V_{PO,CV}$. Tabel 3.4 bevat deze gesimuleerde $V_{PI,CS}$, $V_{PI,CV}$ en $V_{PO,CV}$ voor de verschillende

z:h:GEM	$V_{PI,TH}$	$V_{PI,CS}$	$V_{PI,CV}$	$V_{PI,LDV}$	$V_{PO,CV}$	$V_{PO,LDV}$
8 μ m:1.0 μ mGEMI	118V		99.6V	82.4V	78.6V	69.6V
8 μ m:2.0 μ mGEMI	84V	87V	76.7V	79.7V	55.5V	52.8V
8 μ m:2.5 μ mGEMI	75V		66.9V		50.4V	
8 μ m:2.5 μ mGEMII	70V		58.9V	33.6V	44.0V	26.3V
10 μ m:2.5 μ mGEMI	48V	46.6V	42.0V	38.8V	28.6V	27.0V
10 μ m:3.0 μ mGEMI	44V		38.2V		24.9V	
10 μ m:3.0 μ mGEMII	41V		33.5V	19.3V	21.8V	15.2V
15 μ m:2.0 μ mGEMI	24V	20.4V	18.3V	19.7V	11.7V	12.4V
15 μ m:3.0 μ mGEMI	20V		15.5V	13.5V*	10.7V	8.4V*
15 μ m:4.0 μ mGEMI	17V		13.8V	15.0V	8.8V	5.1V
20 μ m:2.0 μ mGEMI	13V		9.4V	11.5V	6.2V	4.1V
20 μ m:3.0 μ mGEMI	11V		8.0V	7.4V*	5.3V	4.2V*
20 μ m:4.0 μ mGEMI	9V		7.2V		4.7V	

Tabel 3.4: Verwachte en gemeten V_{PI} en V_{PO} voor verschillende SiGe-microspiegels.

(* Meting uitgevoerd door Fangzhou Ling [4])

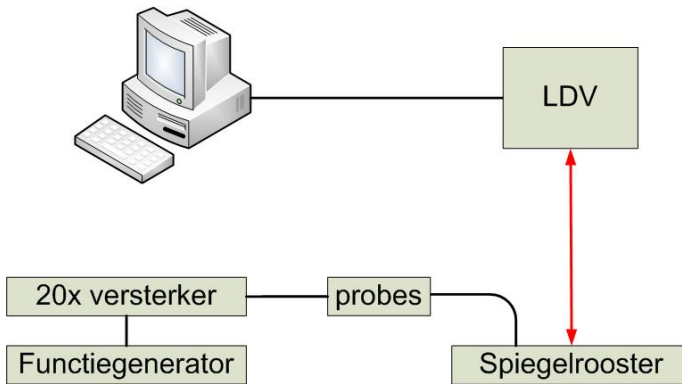
spiegelmodellen.

De gesimuleerde V_{PI} -resultaten liggen in de lijn van de theoretisch bepaalde waarden. Grotere spiegels of langere hengsels doen de V_{PI} dalen. Voor $V_{PO,CV}$ die een lagere waarde heeft dan de overeenkomstige $V_{PI,CV}$, geldt dezelfde afhankelijkheid. Zo hebben de 8 μ m-microspiegels relatief hoge spanningen om de spiegel in te doen klappen. Door grotere microspiegels met bijvoorbeeld 20 μ m-spiegelzijde te kiezen worden meer aanvaardbare *pull-in*-spanningen bekomen voor implementatie met standaard-elektronica (zie Tabel 3.4).

3.3.3 Experimenteel resultaat

Om het gedrag van de gefabriceerde microspiegels van GEMI en GEMII te onderzoeken werden metingen uitgevoerd met de Laser Doppler Vibrometer (LDV) in imec. De LDV laat toe om snelheid en zo ook verplaatsing uit het vlak te meten. Een laserstraal wordt gericht op een punt op de geactueerde spiegel. Via het Dopplereffect is het mogelijk de snelheid uit het vlak te detecteren. Door integratie in de tijd wordt de verplaatsing bekomen. Samen met de aangelegde elektrische spanningen wordt zo de spiegelverplaatsing experimenteel bepaald en bijgevolg ook V_{PI} en V_{PO} . Door de meting te herhalen voor verschillende punten op de spiegel wordt de spiegelhoek α verkregen. De LDV-opstelling is weergegeven in Figuur 3.9.

Om V_{PI} en V_{PO} experimenteel te bepalen, wordt op de elektrode aan één kant van de microspiegel een driehoekssignaal aangelegd. De spiegel- en landingelektrode worden arbitrair op 0V geplaatst. Bij de stijgende flank



Figuur 3.9: Laser Doppler Vibrometer (LDV)-opstelling.

van het driehoekssignaal treedt *pull-in* op. Daarna, wanneer de spanning terug daalt op de dalende flank, kan de spiegel terug uitklappen. De elektrodespanning op het moment van in- en uitklappen komt respectievelijk overeen met V_{PI} en V_{PO} voor de betreffende spiegel. Deze experimenteel bekomen $V_{PI,LDV}$ en $V_{PO,LDV}$ staan tevens opgesomd in Tabel 3.4. Alle metingen op '2x1'-spiegels werden verricht aan de lage frequentie 1kHz tenzij anders vermeld.

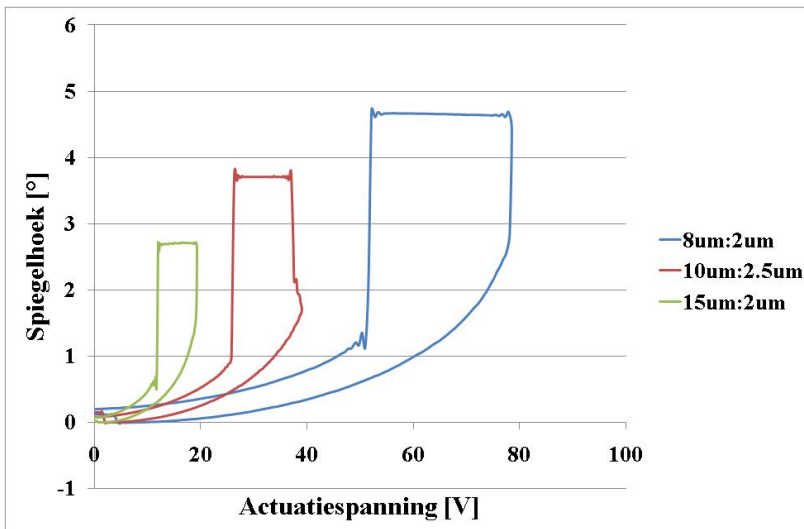
De resultaten geven een gelijkaardige daling van $V_{PI,LDV}$ en $V_{PO,LDV}$ in functie van de spiegelgrootte. *Grosso modo* valt er ook een daling te herkennen bij langere hengsels voor eenzelfde spiegelgrootte. De GEMI- en GEMII-microspiegels verschillen in hengselbreedte. De kleinere hengselbreedte voor de GEMII-spiegel (zie Subsectie 2.2.2.1) geeft een verdere verlaging van de *pull-in*- en *pull-out*-spanning. De kleinere effectieve tussenruimte g (zie Sectie 3.2) verklaart de lagere $V_{PI,LDV}$ en $V_{PO,LDV}$ vergeleken met de overeenkomstige gesimuleerde spanningswaarden. Andere anomalieën kunnen uitgelegd worden door variaties tussen spiegels van dezelfde matrix onderling of variatie tussen spiegelmatrices van verschillende samples. Om hier meer zicht op te krijgen werd de uniformiteit van enkele spiegelmatrices onderzocht. De resultaten daarvan worden toegelicht in Sectie 3.3.5.

3.3.4 Spiegelhoek versus actuatiespanning

Om de spiegelhoek te volgen als functie van de spanning, worden scanpunten in een rij op de te meten spiegel gekozen. Op die manier wordt via LDV-meting de spiegelhoek α gevolgd. Figuur 3.10 toont α in functie van de actuatiespanning voor drie verschillende '2x1'-spiegels ($8\mu\text{m}$: $2.0\mu\text{m}$ GEMI,

$10\mu\text{m}:2.5\mu\text{mGEMI}$ en $15\mu\text{m}:2.0\mu\text{mGEMI}$). De stijgende spanning laat de spiegels inklappen op de landingelektrodes. Dan blijft de spiegel op deze positie en blijft de spiegelhoek constant bij dalende spanning. Bij de overeenkomstige *pull-out*-spanning wordt de spiegel terug losgelaten en roteert de spiegel bij verder dalende actuatiespanning geleidelijk naar de begintoestand. Resultaat zijn hysteresiscurves analoog aan Figuur 3.7. Op basis van zo'n curves werd voor de '2x1'-spiegels de maximale spiegelhoek onderzocht. In Tabel 3.5 staat deze $\alpha_{max,gemeten}$ samen met de ideale maximale spiegelhoek $\alpha_{max,ideaal}$. Daaruit valt te concluderen dat de reële maximale hoek voor de behandelde spiegels tot de helft kleiner is dan verwacht.

De reden hiervoor zou deels kunnen gevonden worden in afwijkende spiegelafmetingen ten opzichte van het ideaal. Indien we op basis van deze gemeten maximale spiegelhoek de spiegel-elektrodeafstand afleiden, bekommen we $g_{afgeleid}$ tussen $0.33\mu\text{m}$ en $0.37\mu\text{m}$. Deze afstand is substantieel kleiner dan de vooropgestelde $0.6\mu\text{m}$ -tussenruimte, in tegenstelling tot de FIB-doorsnede voor de GEMI-spiegel in Sectie 3.2. Ook is er het zogenoemde pistoneffect, waarbij de hingsels bij actuatie de neiging hebben te buigen naar de elektrodes toe en zo de spiegelhoek verlagen. Dit laatste effect wordt nader onderzocht in Sectie 3.5.1.



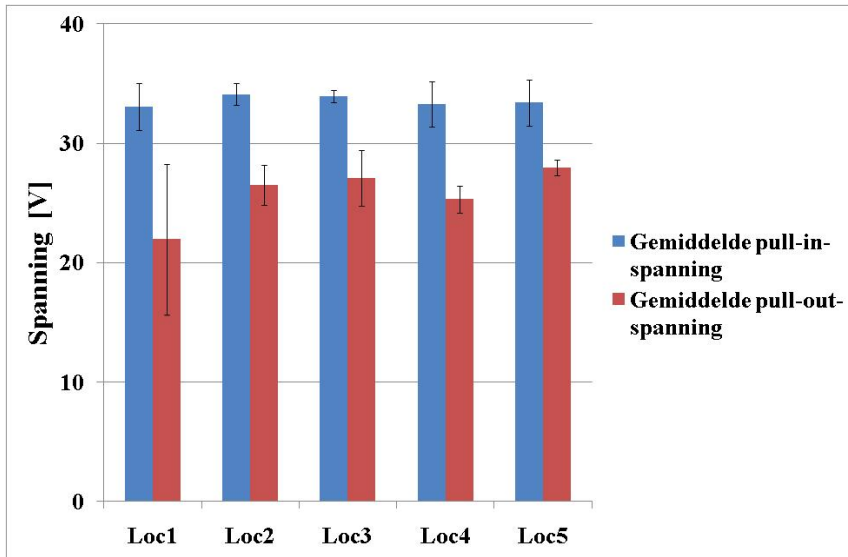
Figuur 3.10: Spiegelhoek α in functie van de actuatiespanning voor een $8\mu\text{m}:2.0\mu\text{mGEMI}$ -, $10\mu\text{m}:2.5\mu\text{mGEMI}$ - en $15\mu\text{m}:2.0\mu\text{mGEMI}$ -microspiegel.

spiegelgrootte	$\alpha_{max,ideaal} [^\circ]$	$\alpha_{max,LDV} [^\circ]$	$g_{afgeleid} [\mu m]$
8 μm :2.0 μm GEMI	8.5	4.8	0.34
10 μm :2.5 μm GEMI	6.8	3.8	0.33
15 μm :2.0 μm GEMI	4.6	2.8	0.37

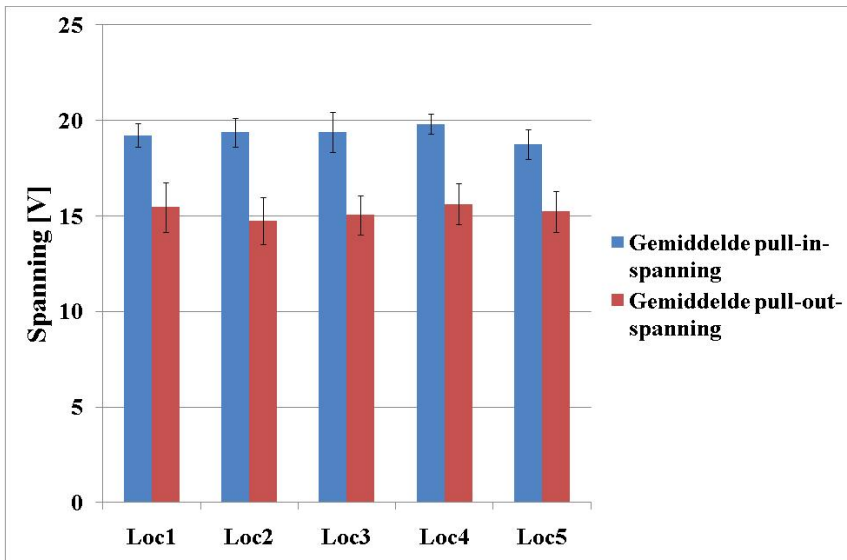
Tabel 3.5: Maximale spiegelhoek voor de verschillende spiegelgroottes, i.e. de theoretische $\alpha_{max,th}$ en de op GEMI-spiegels gemeten $\alpha_{max,LDV}$.

3.3.5 Uniformiteit

Om de uniformiteit van V_{PI} en V_{PO} na te gaan voor de hele spiegelmatrix, werden op vijf verschillende locaties (linksonder, linksboven, midden, rechtsonder en rechtsboven) de *pull-in*-spanning V_{PI} en de *pull-out*-spanning V_{PO} van enkele spiegels gemeten met behulp van de LDV. Figuren 3.11 en 3.12 tonen deze waarden voor V_{PI} en V_{PO} voor respectievelijk een 8 μm :2.5 μm GEMII- en een 10 μm :3 μm GEMII-spiegelmatrix, dit samen met de standaardafwijking.



Figuur 3.11: Uniformiteit a.d.h.v de pull-in- en pull-out-spanning voor vijf locaties op een 8 μm :2.5 μm GEMII-spiegelmatrix. (1: linksonder, 2: rechtsonder, 3: linksboven, 4: rechtsboven, 5: midden)



Figuur 3.12: Uniformiteit a.d.h.v de pull-in- en pull-out-spanning voor vijf locaties op een 10µm:3µm GEMII-spiegelmatrix. (1: linksonder, 2: rechtsonder, 3: linksboven, 4: rechtsboven, 5: midden)

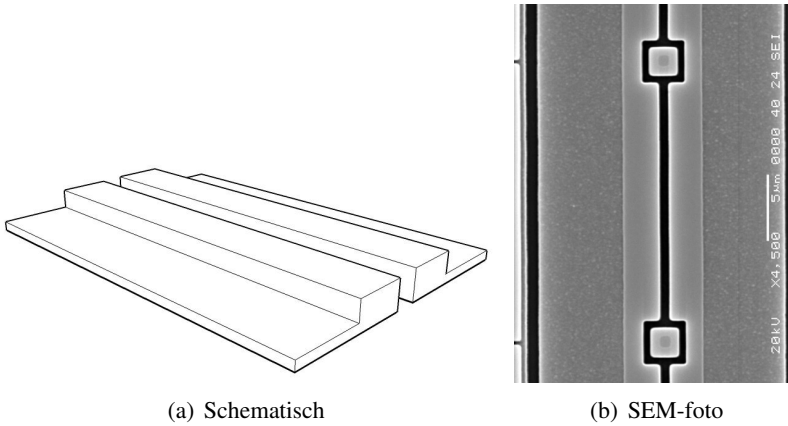
	$V_{PI,2x1,CV}$ [V]	$V_{PI,GRAD,CV}$ [V]
8 μ m:2.5 μ mGEMI	66.9V	61.8V
10 μ m:3 μ mGEMI	38.2V	34.8V
15 μ m:4 μ mGEMI	13.8V	12.7V
20 μ m:3 μ mGEMI	8.0V	7.3V

Tabel 3.6: Gesimuleerde V_{PI} voor '2x1'- en graduele elektrodeconfiguratie.

We zien dat V_{PI} en V_{PO} verschillen, zowel tussen posities op de matrix, als tussen de spiegels op een bepaalde locatie. Verschillen in de afmetingen tussen microspiegels onderling kunnen deze afwijkingen verklaren. Algemeen is de standaardafwijking voor V_{PO} meestal groter dan voor V_{PI} . Dit is gerelateerd met het fenomeen stictie. Dit betekent dat de spiegel langer blijft 'kleven' aan de landingelektrode. Dit fenomeen leidt naast een daling ook tot een grotere spreiding van de *pull-out*-spanning. Stictie en reductie ervan worden verder besproken in Sectie 3.5.2.

3.3.6 Graduele elektrodes

Om compatibiliteit te verkrijgen tussen kleinere microspiegels met standaard elektronicatechnologieën zijn lagere actuatiespanningen wenselijk (bijvoorbeeld een standaard 5V-spanningsbereik). In een vernieuwende elektrodeconfiguratie, een idee ontwikkeld tijdens dit doctoraat, werd voor het elektrodegedeelte onder het midden van de spiegel een verhoging voorzien. Figuur 3.13(a) toont een schematische voorstelling van twee 'graduele' elektrodes voor eenzelfde microspiegel. De realisatie van deze elektrodeconfiguratie staat afgebeeld op de SEM-foto van Figuur 3.13(b). Deze zogenoemde graduele actuatielektrodes maken op deze manier gebruik van de beschikbare ruimte onder de spiegel wanneer deze zich in ingeklapte toestand bevindt. De afstand tussen spiegel en elektrode verkleint voor dit verhoogd gedeelte en induceert bijgevolg een sterkere elektrostatische aantrekking. Tabel 3.6 bevat gesimuleerde V_{PI} voor verschillende spiegels met enerzijds de normale '2x1'- en anderzijds de nieuwe graduele elektrodeconfiguratie. Hieruit volgt inderdaad een verlaging van V_{PI} door toepassing van de graduele elektrodeconfiguratie. Experimenteel werd dit bevestigd voor de 20 μ m:3 μ m-microspiegel. De gemeten *pull-in*-spanning voor de '2x1'-spiegel, nl. 7.4V, wordt verlaagd tot 6.4V voor de graduele configuratie (metingen uitgevoerd door Fangzhou Ling [4]).



Figuur 3.13: Graduele elektrodeconfiguratie.

3.4 Dynamiek

In deze sectie gaan we dieper in op het dynamisch gedrag van de '2x1'-SiGe-microspiegels.

3.4.1 Frequentieantwoord

Om het dynamisch aspect van microspiegels te analyseren kunnen we de roterende spiegel voorstellen als een eenvoudig massa-veersysteem. Voor de resonantiefrequentie vinden we de volgende uitdrukking [7]:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\alpha}}{I}} \quad (3.7)$$

met traagheidsmoment I :

$$I = \rho_{SiGe} t \frac{z^4}{12} \quad (3.8)$$

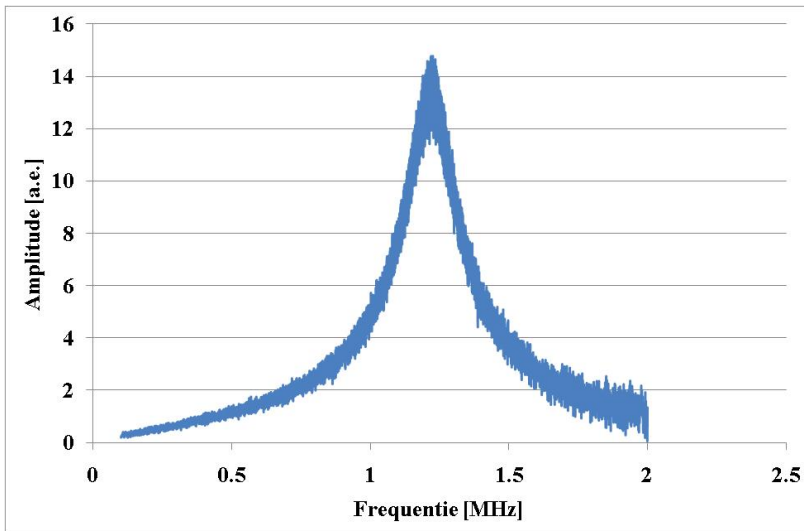
Hierbij stelt ρ_{SiGe} de massadichtheid van SiGe voor en t de dikte van de spiegel. Voor een theoretische berekening gaan we uit van een spiegel met enkel de SiGe-laag. Tabel 3.7 vat berekende waarden $f_{res,TH}$ samen voor verschillende spiegels. We concluderen dat bij grotere spiegelgrootte en zelfde hengsellengte de resonantiefrequenties dalen. Voor dezelfde spiegelgrootte daalt deze frequentie voor langere hengsels.

Een meer gesofisticeerde schatting van de resonantiefrequentie doen we met behulp van het simulatieprogramma *Coventor*. Zo werd voor de

Spiegel	$f_{res,TH}$ [MHz]	$f_{res,CV}$ [MHz]	$f_{res,LDV}$ [MHz]
8 μ m:1.0 μ mGEMI	4.58	2.99	
8 μ m:2.0 μ mGEMI	3.24	2.24	
8 μ m:2.5 μ mGEMI	2.90	2.01	
8 μ m:2.5 μ mGEMII	2.72	1.75	1.4*
10 μ m:2.5 μ mGEMI	1.86	1.30	
10 μ m:3.0 μ mGEMI	1.69	1.19	1.22
10 μ m:3.0 μ mGEMII	1.59	1.03	0.8*
15 μ m:2.0 μ mGEMI	0.92	0.635	0.44
20 μ m:3.0 μ mGEMI	0.42	0.298	0.13

Tabel 3.7: Resonantiefrequenties voor de verschillende spiegelgroottes. ($f_{res,TH}$: Theoretisch, $f_{res,CV}$: Coventor, $f_{res,LDV}$: LDV)
(*Nauwkeurigheid: 0.1MHz)

frequentiewaarden $f_{res,CV}$ nu wel rekening gehouden met de drielaagigheid van de microspegel (SiGe+SiC+Al). Tabel 3.7 toont deze gesimuleerde waarden die telkens lager zijn dan de eerder berekende waarden voor een enkellaagige SiGe-spiegel. Door de smallere en dus meer elastische hengsels voor de GEMII-spiegels is de $f_{res,CV}$ kleiner dan voor de overeenkomstige GEMI-spiegelconfiguratie.



Figuur 3.14: Frequentieantwoord van de 10 μ m:3.0 μ mGEMI-microspegel.

Om voor verschillende spiegels de resonantiefrequentie experimenteel te bepalen, werden deze aangestuurd met een sinus-actuatiespanning waarvan de DC-component zorgt dat het gehele signaal positief blijft. Voor de

10 μm :3.0 μm GEMI-microspiegel werd een frequentiesweep aangelegd en tegelijkertijd opgemeten met de LDV. Figuur 3.14 geeft het frequentieantwoord, i.e. de amplitude van de gemeten snelheid op een scanpunt op een spiegel voor de verschillende frequenties. We vinden een resonantiepiek bij 1.22 MHz. We leiden de Q-factor af (met Δf de bandbreedte):

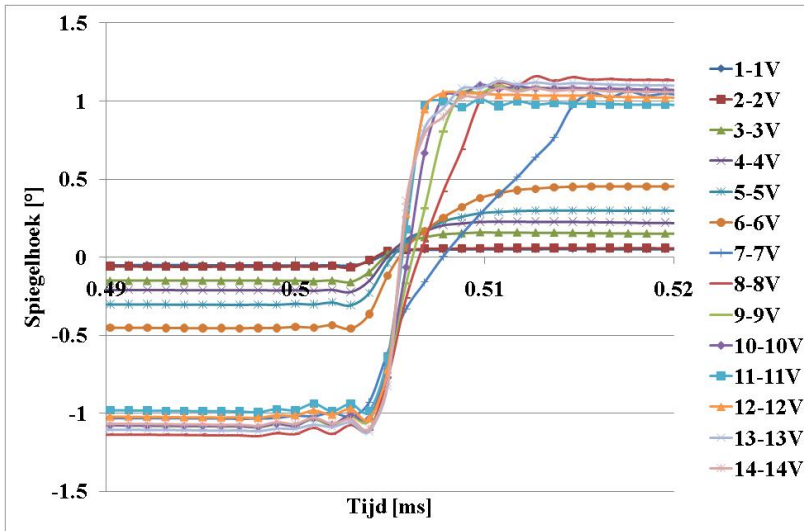
$$Q = \frac{f_{res}}{\Delta f} \approx 4.5 \quad (3.9)$$

Dit illustreert het ondergedempt karakter van de SiGe-microspiegel. Andere gemeten $f_{res,LDV}$ zijn aangevuld in Tabel 3.7. De laagste gemeten resonantiefrequenties blijven twee ordes groter dan de frequenties die inwerken op een toestel (bij normaal handelen). Dit bevestigt de schokbestendigheid [8].

3.4.2 Schakelen

In deze subsectie gaan we na of we de spiegels op verschillende hoeken kunnen schakelen met behulp van een tegenfase blok golfaansturing op de twee elektrodes. De blok golf schakelt tussen de actuatiespanning en 0V. De meting werd terug uitgevoerd met de LDV. Hierbij merken we op dat bij elke start van een LDV-meting de verplaatsing op nul wordt gezet. De LDV meet bijgevolg enkel relatieve verplaatsing ten opzichte van de beginpositie van de spiegel. Figuur 3.15 werd hier in die zin aangepast dat de uiterste stabiele spiegelhoek op tijdstippen 0.47ms en 0.53ms symmetrisch ten opzichte van de nulhoek werden getransleerd. Op die manier hebben we een beter overzicht van de spiegelwerking.

We krijgen nu een schakelgedrag waarbij voor de lagere toenemende spanningen de rotatiehoek tussen de twee toestanden vergroot en zo tussen intermediaire spiegelposities wordt geschakeld. De schakeltijd varieert naargelang de rotatie die moet worden uitgevoerd. Hoe groter de rotatiehoek, hoe langer de schakeltijd. Voor de situatie 6V-6V bedraagt deze $\sim 12\mu\text{s}$ ten opzichte van $\sim 4\mu\text{s}$ voor de 1V-1V situatie. Vanaf de 7V-7V situatie zien we een kloof met de vorige spiegelhoeken. Dit betekent dat de spiegel vanaf deze spanning de uiterste spiegelpositie op de landingelektrodes bereikt. Nu is het gedrag verschillend van de intermediaire aansturing. Hoe hoger de actuatiespanningen, des te sneller de spiegel de andere ingeklapte positie bereikt. Zo duurt de 7V-7V schakeling $\sim 13\mu\text{s}$ tegenover $\sim 4\mu\text{s}$ voor de 11V-11V situatie (cfr. een schakeltijd tussen de uiterste ingeklapte toestanden voor DMD van $\sim 5\mu\text{s}$ zoals vermeld in [1]).



Figuur 3.15: Zoom van het symmetrisch schakelen van een $15\mu\text{m}:4.0\mu\text{m}$ GEMII-microspiegel.

3.5 Ongewenste effecten

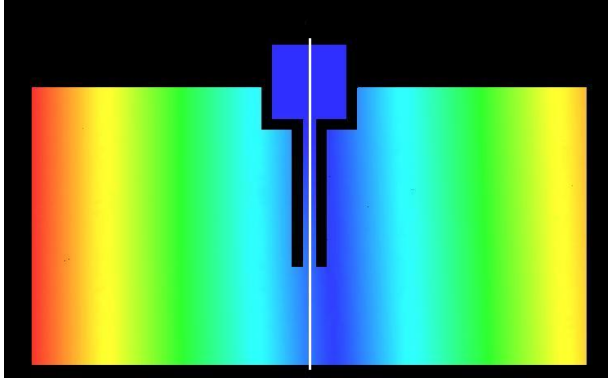
Tijdens het onderzoek op de '2x1'-SiGe-microspiegels doken enkele ongewenste effecten op. We bespreken fenomenen als pistoneffect, stictie, spiegelschade en spiegeloverspraak.

3.5.1 Pistoneffect

In Subsectie 3.3.4 vermeldden we al dat de gemeten maximale spiegelhoek α_{max} bijna de helft kleiner is dan de ideale hoek (zie Tabel 3.5). Enerzijds is de spiegel-elektrodeafstand g een belangrijke factor. Indien de werkelijke g kleiner is dan vooropgesteld, bekomt men een kleinere α_{max} . Dit is zeker het geval voor het GEMII-ontwerp (CMP-probleem), in geringe mate ook voor GEMI (zie Figuur 3.4). Anderzijds is er het fenomeen pistoneffect. Dit is het effect waarbij de spiegel niet enkel roteert rond de hengsels, maar ook samen met de hengsels wat buigt naar de elektrodes toe. Het gevolg is een kleinere α_{max} . In deze subsectie gaan we hier wat dieper op in.

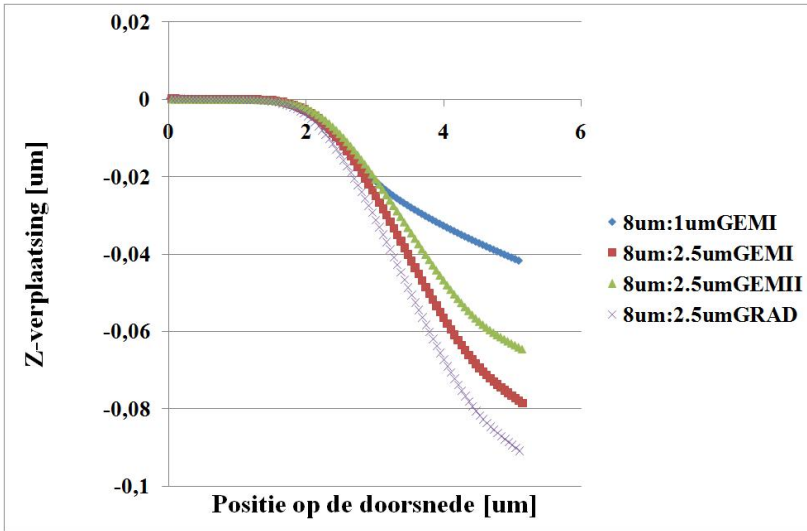
Figuur 3.16 toont het bovenaanzicht van een microspiegel in *Coventor*. De witte lijn stelt de doorsnede voor die we zullen beschouwen voor verschillende microspiegels. Figuren 3.17, 3.18, 3.19 en 3.20 tonen de gesimuleerde verplaatsing uit het vlak ten opzichte van de doorsnede in het midden van de respectievelijk 8-, 10-, 15- en $20\mu\text{m}$ -'2x1'-microspiegels bij

een aanstuurspanning aan één zijde van de spiegel, net boven de overeenkomstige *pull-in*-spanning V_{PI} .

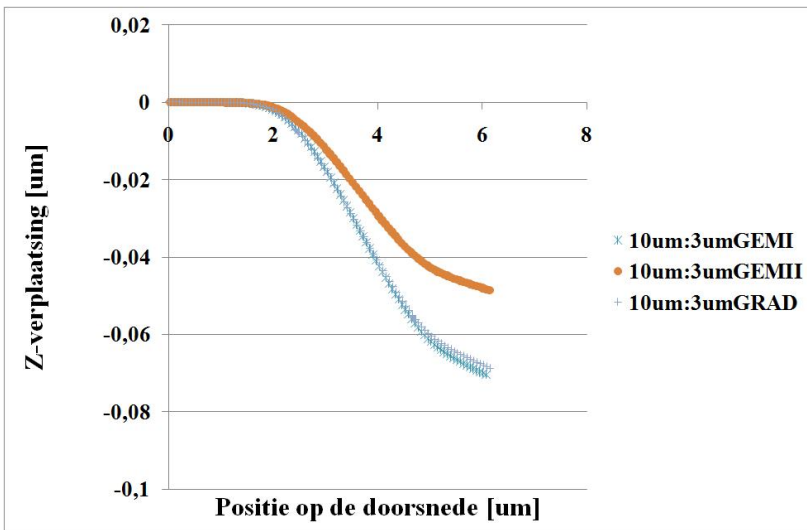


Figuur 3.16: Bovenaanzicht van een microspiegelmodel in Coventor met aanduiding doorsnede (witte lijn).

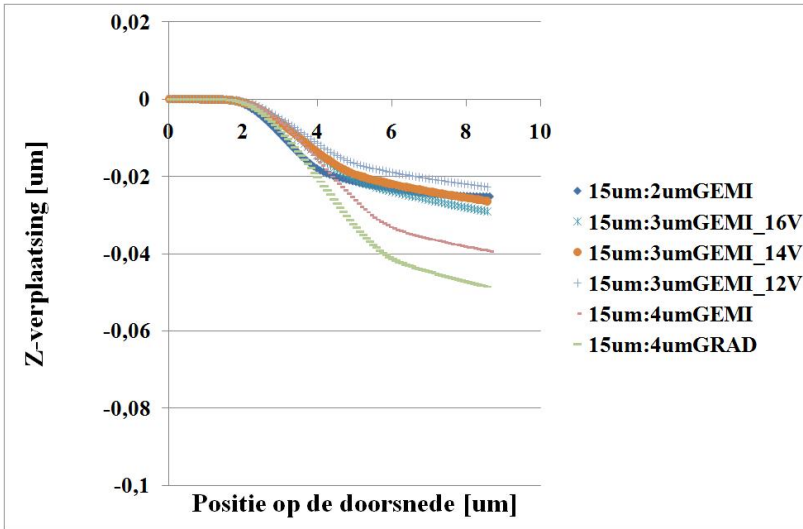
Verschillende parameters werken in op de mate waarop de microspiegel meer 'inzakt'. Figuur 3.17 illustreert voor een $8\mu\text{m}$ -microspiegel dat het pistoneffect groter is voor het langere $2.5\mu\text{m}$ -hengsel dan in het geval van een $1.0\mu\text{m}$ -hengsel. Het verschil tussen de $8\mu\text{m}:2.5\mu\text{m}$ GEMI- en $8\mu\text{m}:2.5\mu\text{m}$ GEMII-microspiegel ligt in het smallere hengsel voor het GEMII-ontwerp. Een smaller hengsel vermindert het pistoneffect. De $8\mu\text{m}:2.5\mu\text{m}$ -microspiegel met graduele elektrodes geeft het slechtste resultaat. De maximale verplaatsing naar de elektrodes toe bedraagt ongeveer $0.09\mu\text{m}$. Voor de andere Figuren 3.18, 3.19 en 3.20 geldt hetzelfde: Langere hengsels, bredere hengsels en graduele elektrodes bevorderen het pistoneffect. Figuur 3.19 illustreert voor de dalende aanstuurspanningen 16V, 14V en 12V een afnemend pistoneffect bij de $15\mu\text{m}:3.0\mu\text{m}$ GEMI-microspiegel. Indien we de pistonverplaatsing vergelijken voor verschillende spiegelgroottes, zien we dat grotere microspiegels minder gevoelig zijn voor het pistoneffect. Voor het geval van de $15\mu\text{m}:2.0\mu\text{m}$ GEMI-microspiegel vinden we dat de gesimuleerde α_{max} 4.38° bedraagt. Dit is een afwijking van 0.2° ten opzichte van de verwachte ideale spiegelhoek. Als we dit vergelijken met de gemeten $\alpha_{max} = 2.8^\circ$, kunnen we besluiten dat de lagere gemeten α_{max} voor de '2x1'-microspiegels een combinatie is van een kleinere spiegel-elektrodeafstand g en het piston effect. Het piston-effect kunnen we in zekere zin beperken door te kiezen voor korte, smalle hengsels voor de spiegels zonder een graduele elektrodeconfiguratie.



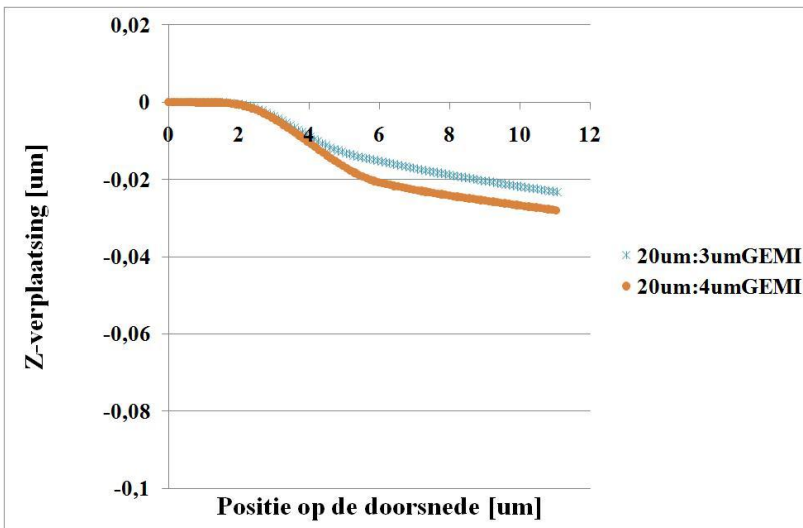
Figuur 3.17: Gesimuleerde verplaatsing uit het vlak op 8µm-microspiegels voor punten op de doorsnede.



Figuur 3.18: Gesimuleerde verplaatsing uit het vlak op 10µm-microspiegels voor punten op de doorsnede.



Figuur 3.19: Gesimuleerde verplaatsing uit het vlak op 15 μm -microspiegels voor punten op de doorsnede.



Figuur 3.20: Gesimuleerde verplaatsing uit het vlak op 20 μm -microspiegels voor punten op de doorsnede.

3.5.2 Stictie

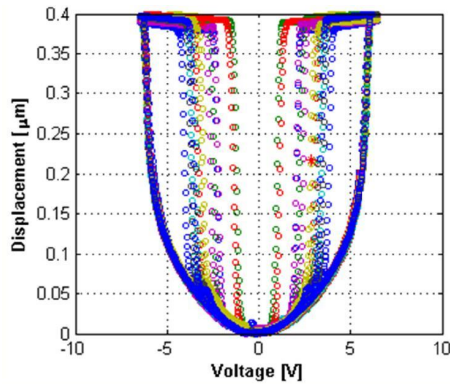
Fangzhou Ling heeft gevonden dat de spreiding op de *pull-out*-spanning voornamelijk is te wijten aan stictie [4]. Dit werd bekomen door metingen op door ons ontworpen SiGe-microspiegels. Het langer blijven 'kleven' van een microspiegel op de landingelektrode heeft voornamelijk twee oorzaken. De eerste is de aanwezigheid van eventuele watercondens op de landingelektrodes. De bijkomende capillaire kracht is een bijkomende hindernis om de spiegel van de ingeklapte toestand te bevrijden. Bijgevolg verlaagt de *pull-out*-spanning. De andere oorzaak is Van Der Waalskrachten. Deze laten materialen elkaar aantrekken op moleculair niveau.

Enkele manieren om met deze ongewenste krachten komaf te maken, zijn het verpakken van de spiegels en het deponeren van een antikleeflaag. Door de spiegelchip hermetisch af te sluiten van de buitenwereld, worden externe watermoleculen buitengehouden. De droge omgeving reduceert op die manier de invloed van capillaire krachten. Een antikleeflaag op de landingelektrode, die de eigenschap heeft de oppervlakte-energie tussen spiegel en landingelektrode te verlagen, reduceert de Van Der Waalskrachten. Een SAM (*Self Assembled Monolayer*)-laag kan hydrofoob werken en de neiging tot binding met watermoleculen verder verlagen. Een andere reductie van aantrekking kan bekomen worden door het contactoppervlak te verkleinen, zoals bij de extra aangebrachte springveertjes onderaan de DMD-spiegel [1].

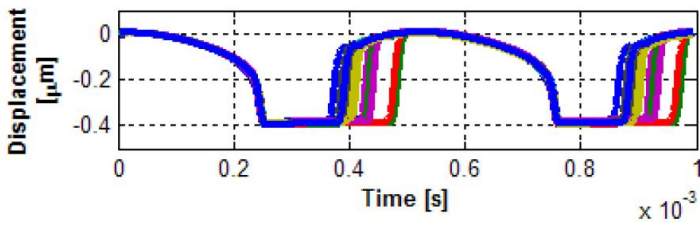
In het kader van het Gemini-project werd op de door ons ontworpen SiGe-microspiegels de mogelijkheid tot stictie-reductie onderzocht door *Fangzhou Ling* [4]. Verschillende spiegels van een $20\mu\text{m}:4\mu\text{m}$ GEMIMatrix met graduele elektrodes werden in lucht geactueerd met hetzelfde driehoekssignaal. De spiegelverplaatsing werd gemeten (zie Figuur 3.21)) en illustreert de spreiding op de *pull-out*-spanning. Dezelfde test werd uitgevoerd op een spiegelmatrix waar een SAM-laag van FDTS (1H, 1H, 2H, 2H-perfluorodecyltrichlorosilaan) op is gedeponerd. De analoge Figuur 3.22 toont een sterke reductie van de spreiding op *pull-out*. Voor deze spiegels verkleinde de standaardafwijking op de *pull-out*-spanning van 22% tot 5%. Andere spiegels werden ook getest met telkens een gelijkwaardige vermindering in *pull-out*-spreiding [4]. Ook werd aangetoond dat de FDTS-SAM-laag de betrouwbaarheid op lange termijn bevordert. Geen degradatie werd opgemerkt na 1×10^9 cycli.

3.5.3 Spiegelschade

Uiteraard is het desastreus als een enkele spiegel van de gehele chip beschadigd is. Daar herstelling op MEMS-niveau uit den boze is, is men op

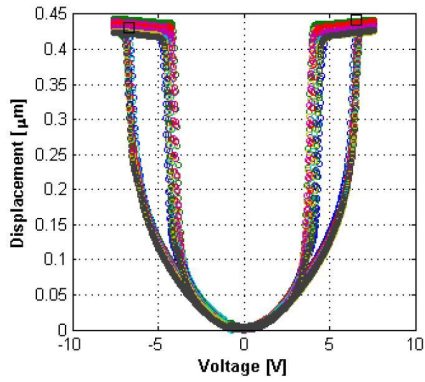


(a) Verplaatsing vs. actuatiespanning

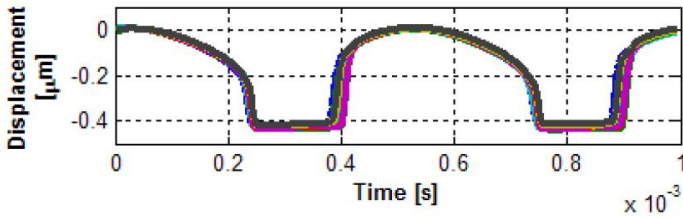


(b) Verplaatsing vs. tijd

Figuur 3.21: Gedrag 20 μm :4 μm GEMI-spiegels zonder FDTS-SAM-laag [4].



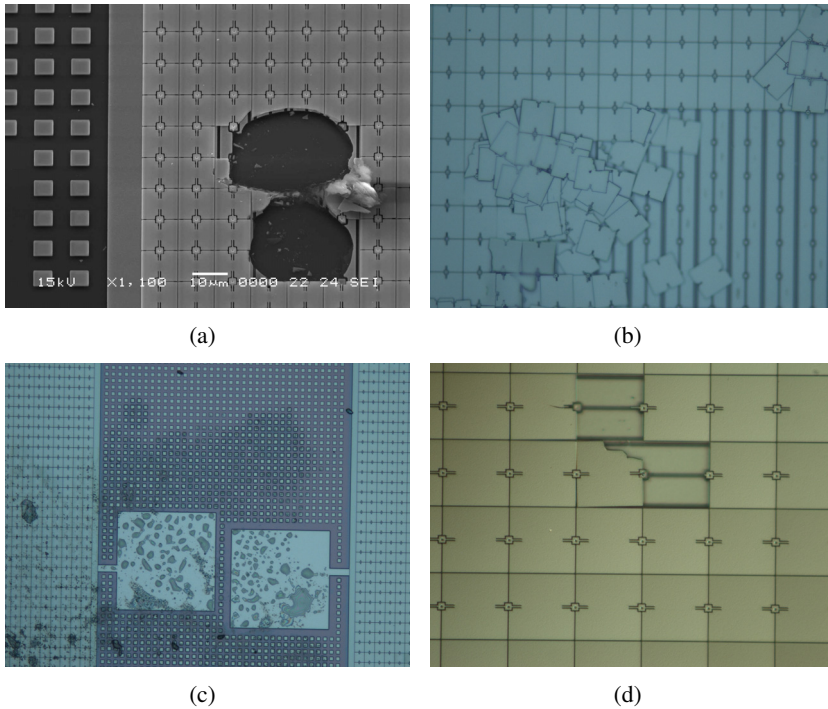
(a) Verplaatsing vs. actuatiespanning



(b) Verplaatsing vs. tijd

Figuur 3.22: Gedrag $20\mu\text{m}:4\mu\text{m}$ GEMI-spiegels met FDTS-SAM-laag [4].

preventie aangewezen.



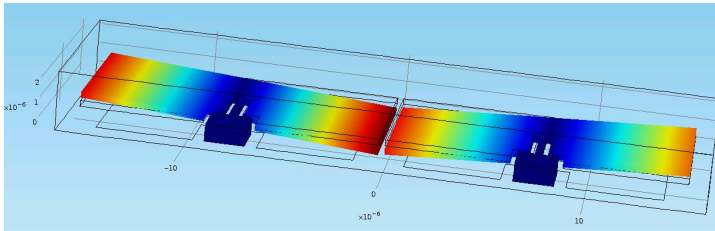
Figuur 3.23: Microscopfoto's van verschillende beschadigde SiGe-microspiegels.

Tijdens het onderzoek troffen we verscheidene defecte spiegels aan. In Figuur 3.23 worden enkele duidelijk beschadigde spiegels afgebeeld. Het voorzichtig behandelen van de chip is belangrijk.

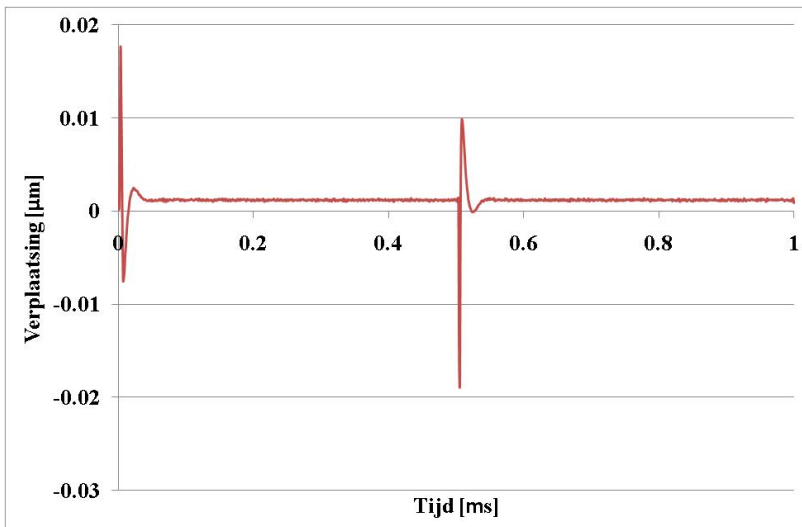
Het verpakken en afschermen vrijwaart de chip van externe invloeden zoals stof, luchtstroming, watercondens, enz. Naast deze voorzorg dienen ander effecten in rekening gebracht te worden, zoals ESD (Elektrostatische ontlading) en EOS (Elektrische overspanning) [9–11]. Een plotse hoge spanning of stroom kan spiegels beschadigen of vervormen. Het dragen van een antistatisch polsbandje bij het hanteren van de chip reduceert het risico. *Jeroen De Coster* vond een manier om de spiegels verder te beschermen, door een serieweerstand van $1\text{M}\Omega$ in het aardingpad toe te voegen. Dit werd toegepast bij alle LDV-metingen besproken in dit doctoraat. Dit zorgt voor een grotere robuustheid van de spiegelmatrix zoals vermeld in [11].

3.5.4 Overspraak tussen spiegels

In eerste instantie controleerden we of het aangebrachte elektrische veld bij een $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMI-microspiegel enige invloed heeft op de werking van een aanliggende microspiegel. Concreet verifieerden we de *pull-in*-spanning van de rechtse spiegel in het *Comsol*-model uit Figuur 3.24(a). Twee simulaties werden uitgevoerd. In de eerste simulatie werd de linkse spiegel niet geactueerd en de vastgestelde *pull-in*-spanning van de rechtse spiegel was 16.9V. Vervolgens werd de linkse microspiegel aangestuurd tot net niet de *pull-in*-spanning, namelijk 16.8V (zie Figuur 3.24(a)). Bij deze situatie bekwamen we een onveranderde *pull-in*-spanning voor de rechtse spiegel, i.e. 16.9V. We concluderen hieruit dat overspraak door nabijgelegen elektrische velden bijzonder gering is.



(a) Overspraakmodel in COMSOL



(b) Verplaatsing niet-geactueerde spiegel

Figuur 3.24: Overspraak bij $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMII-'2x1'-microspiegel.

Een experimentele test werd uitgevoerd op $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMII-SiGe-microspiegels. De dynamische actuatie voor een kolom microspiegels was een blokvolgfaansturing zodat de spiegels in *pull-in* gaan en terug uitklappen. We controleerden de verplaatsing op de rand van een aangrenzende spiegel. Figuur 3.24(b) toont dat de niet-geactueerde spiegel meetrilt bij de schakelmomenten van de aangrenzende geactueerde spiegel. Het overgangsverschijnsel voor deze situatie blijft onder 20nm aan de spiegelrand.

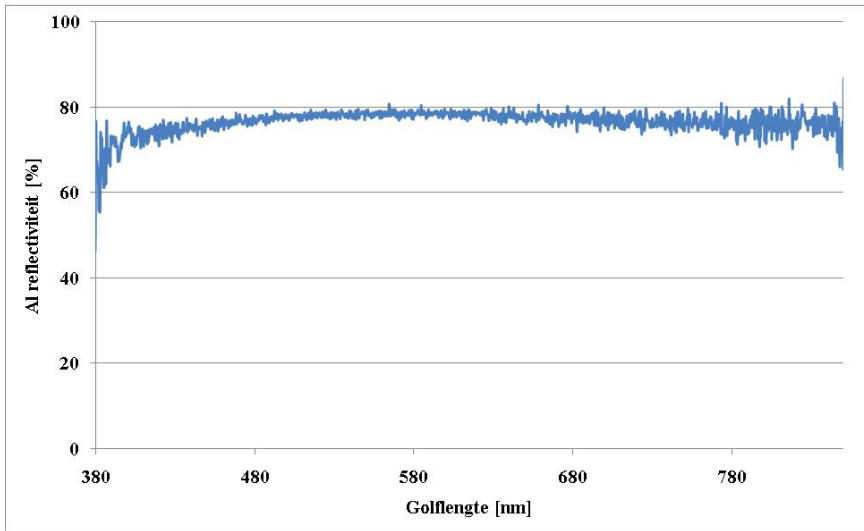
We vermoeden dat eventuele overspraak bij de spiegels niet elektrisch gerelateerd is, maar eerder het gevolg van de luchtverplaatsing rondom de spiegels. Om dit effect te reduceren is het hermetisch verpakken in een ijlere omgeving dan lucht een mogelijke oplossing.

3.6 Reflectiviteit

De gefabriceerde microspiegels bevatten het extra Al-laagje om de reflectiviteit te bevorderen. Om dit te onderzoeken, werd gebruik gemaakt van een *sample* waarop een zelfde Al-laagje is gesputterd. Met behulp van lenzen werd licht gefocuseerd op het Al-plaatje. De weerkaatste lichtbundel komt terecht in een integrerende sfeer die via een optische vezel het licht verder geleidt naar een spectrometer. Het lichtspectrum van deze lichtbundel wordt vervolgens gemeten. De Al-reflectiviteit is de verhouding van het lichtspectrum zonder reflectie, ten opzichte van het weerkaatste lichtspectrum. Figuur 3.25 geeft de reflectiviteit van het Al-plaatje weer voor het zichtbare spectrum.

We zien dat de gemeten Al-reflectiviteit een vlakke karakteristiek heeft net onder 80% voor het zichtbaar spectrum. Het is gewenst dat licht van verschillende golflengtes in eenzelfde mate worden weerkaatst. De reflectiviteit is evenwel kleiner dan bij DMD. In de literatuur vinden we de spiegelreflectiviteit 88% [12].

In dat zelfde document vinden we dat de vulfactor voor die DMD-matrix 92% bedraagt. We vergelijken dit met de theoretische vulfactor voor verschillende groottes van GEMI-SiGe-microspiegels in functie van verschillende hengsellengtes. Merk op dat we de minimale afstand van $0.3\mu\text{m}$ kozen voor de ruimte tussen de spiegels, tussen spiegel en ponton en tussen spiegel en hengel. Figuur 3.26 bewijst dat voor grotere spiegelzijdes er proportioneel minder tussenruimte is ten opzichte van het grotere spiegeloppervlak en bijgevolg de vulfactor stijgt. De grotere inkeping voor langere hengsels doet de vulfactor dalen. Indien vulfactor een belangrijke ontwerpeis is, zouden we kiezen voor grote microspiegels met korte hengsels. Echter dit resulteert in een kleinere maximale spiegelhoek en hogere *pull-in*-spanning. Merk op dat DMD-spiegels verstopte hengsels hebben



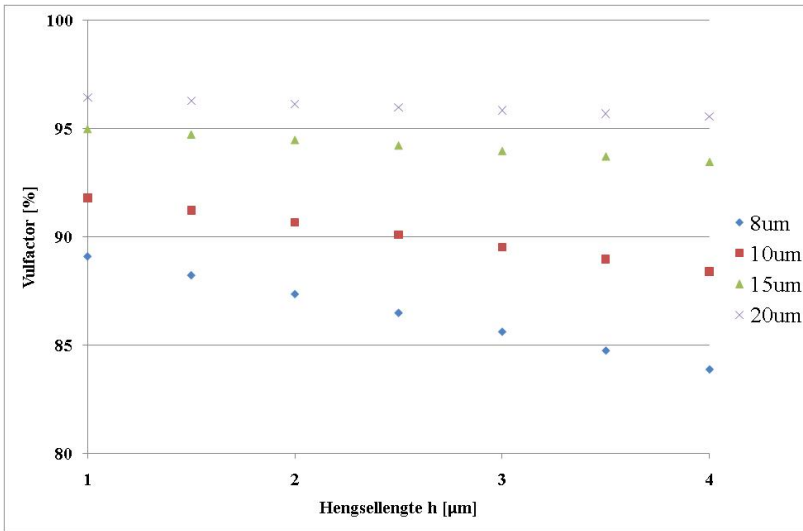
Figuur 3.25: Gemeten Al-reflectiviteit in het zichtbare spectrum.

en dus geen ruimte verliezen door de noodzakelijke inkeping voor de hengsels. Bijgevolg wordt de vulfactor enkel bepaald door de afstand tussen de spiegels. Het Gemini-platform bood echter geen mogelijkheid om met extra processtappen een *hidden-hinge*-model te construeren.

We merken verder op dat de reflectie van het licht naar het scherm ook nog eens zal afnemen door verstrooiing aan de randen van de spiegels maar ook door diffractie. De hele spiegelmatrix gedraagt zich namelijk als een tweedimensionaal diffractiematrix. Het is belangrijk dat de zogenoemde diffractie-efficiëntie van de spiegelmatrix groot genoeg is. Dit is de verhouding van de intensiteit van de gewenste diffractiebundel ten op zichte van de inwerkende lichtintensiteit waarbij enkel het gereflecteerde licht op de spiegeloppervlaktes wordt beschouwd. Volgens dezelfde bron [12] is dit voor de DMD 86%. We gaan hier niet verder op in.

3.7 Demo

Het GEMII-ontwerp bevat ook een demo-matrix bestaande uit $10\mu\text{m}$ -'2x1'-SiGe-microspiegels. Ondanks enkele ontwerpfouten, zien we toch duidelijk de letters 'GEMINI' (op balken in perspectief) te voorschijn komen bij stijgende aanstuurspanning. Figuur 3.27 illustreert dit met vier microscoopbeelden. Net als bij de TMA-matrix in Sectie 1.3.2 varieert de spiegelhoek bij veranderende aanstuurspanning en daardoor de grijswaarde voor

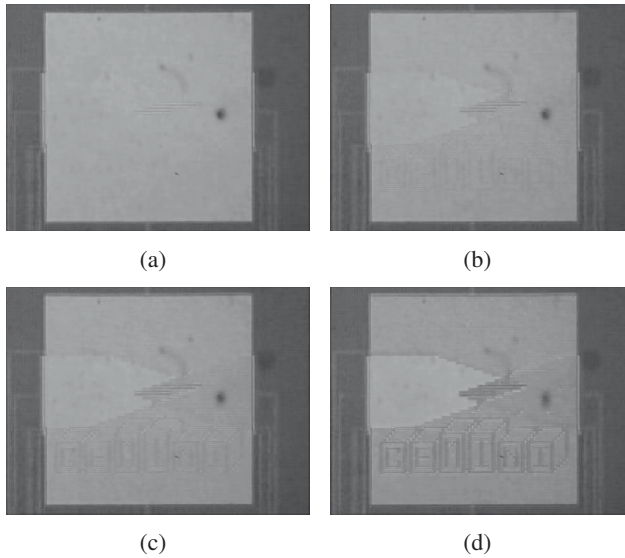


Figuur 3.26: Vulfactoren voor verschillende GEMMI-spiegelgroottes en hengsellengtes.

die pixel. De aanstuurspanning is beperkt zodat de spiegels niet inklappen. Met het gepaste optische systeem vormt zo'n analoge hoeksturing een alternatief voor de PWM-aansturing van microspegel-projectiedisplays.

3.8 Conclusie

In het kader van het Gemini-project werden eenvoudige, zogenoemde '2x1'-SiGe-microspiegels ontworpen, gebaseerd op bestaande *designs*. Na realisatie (door de collega's van imec) werden verschillende '2x1'-matrices met onderling verschillende spiegelgroottes en hengsellengtes onderzocht. Een belangrijke eigenschap bij het gedrag van microspiegels is de *pull-in*- en de *pull-out*-spanning. Deze spanningswaarden geven een idee van de benodigde werkspanningen. De experimentele spanningswaarden liggen in lijn met de gesimuleerde waarden. Om elektrische CMOS-compatibiliteit te bekomen, bijvoorbeeld met een standaard 5V-spanningsbereik, hebben we voldoende lage werkspanningen nodig. Een eerste parameter om de *pull-in*-spanning te verlagen is de spiegelzijde. Grotere spiegels hebben een lagere *pull-in*-spanning maar dit verlaagt tegelijkertijd de maximale spiegelhoek (bij gelijke spiegel-elektrodeafstand). Een tweede parameter is de hengsellengte. Langere hengsels gedragen zich elastischer en laten de spiegels inklappen bij lagere spanning. Ook de hengselbreedte beïnvloedt



Figuur 3.27: Microscoopbeeld van de demo-matrix voor verschillende DC-aansturing.

de pull-in-spanning. Zo heeft een GEMII-spiegel (hengselbreedte: $0.3\mu\text{m}$) een lagere V_{PI} vergeleken met de overeenkomstige GEMI-spiegel (hengselbreedte: $0.35\mu\text{m}$). Als laatste werd een alternatieve 'graduele' elektrodeconfiguratie voorgesteld die de actuatiespanningen nog verder verlaagt. Het dynamisch gedrag van '2x1'-microspiegels werd ook toegelicht. Schakelen tussen uiterste toestanden van een $15\mu\text{m}$ -spiegel werd aangetoond binnen de $5\mu\text{s}$, wat vergelijkbaar is met de DMD-spiegel.

Hiernaast kwamen enkele ongewenste effecten aan het licht. Zo is er de niet-uniformiteit van *pull-in*- en *pull-out*-spanning voor verschillende spiegels in een matrix, mede dankzij stictie (werk van Fangzhou Ling [4]). Het gevolg is een verlaging (en spreiding) van de pull-out-spanning ten gevolge van het blijven kleven van de microspiegel aan de landingelektrode. Een ander effect is het neerwaarts buigen van de hengsels bij ingeklapte toestand. Dit zogenoemde pistoneffect leidt tot een kleinere maximale spiegelhoek. Simulaties leerden dat dit enigszins kan ingeperkt worden door kortere en smallere hengsels te implementeren. Kortere hengsels leiden dan wel weer tot hogere pull-in-spanningen. De observatie van overspraak tussen spiegels is waarschijnlijk eerder het gevolg van luchtverplaatsing dan van elektrische overspraak. Het voorzien van een verpakking met een ijelere omgeving zou dit kunnen verhelpen. Verder werd de Al-reflectiviteit voor de spiegels gemeten. Een vlakke karakteristiek net onder 80% werd waar-

genomen voor het zichtbare spectrum. Tenslotte werd de werking van de '2x1'-SiGe-microspiegels geïllustreerd met een demo-matrix. Indien we een aanvaardbare maximale spiegelhoek verkiezen (cfr. DMD: 10°-12°) tesamen met werkspanningen in een beperkt spanningsbereik, dienen we onze toevlucht te nemen tot een complexere spiegelstructuur. In Hoofdstuk 4 wordt een nieuwe microspiegel besproken waarbij elektrische CMOS-compatibiliteit mogelijk wordt.

Referenties

- [1] P. F. Van Kessel, L. J. Hornbeck, R. E. Meier, and M. R. Douglass. *A MEMS-Based Projection Display*. Proceedings of the IEEE, 86(8):1687–1704, 1998.
- [2] H. Toshiyoshi and H. Fujita. *Electrostatic micro torsion mirrors for an optical switch matrix*. Microelectromechanical Systems, Journal of, 5(4):231–237, 1996.
- [3] O. Degani, E. Socher, A. Lipson, T. Leitner, D. J. Setter, S. Kaldor, and Y. Nemirovsky. *Pull-In Study of an Electrostatic Torsion Micro-actuator*. Journal of Microelectromechanical Systems, 7(4):373–379, 1998.
- [4] L. Fangzhou, J. De Coster, R. Beernaert, W.-Y. Lin, C. J. Pierre, and I. De Wolf. *Stiction reduction in electrostatic poly-SiGe micromirrors by applying a self-assembled monolayer film*. In 21st Micromechanics and Micro systems Europe (MME2010 Workshop), pages 44–47, Enschede, Nederland, 2010.
- [5] <http://www.COMSOL.com/>. <http://www.COMSOL.com/>.
- [6] <http://www.COVENTOR.com/>. <http://www.COVENTOR.com/>.
- [7] Minhang Bao. *Analysis and Design Principles of MEMS Devices*. Elsevier, 2005.
- [8] L. J. Hornbeck. *Digital Light Processing and MEMS: Timely Convergence for a Bright Future (Invited Plenary Paper)*. Proceedings of the SPIE: Micromachining and Microfabrication Process Technology, 2639:2–26, 1995.
- [9] S. Sangameswaran, J. De Coster, G. Groeseneken, and I. De Wolf. *Impact of design factors and environment on the ESD sensitivity of MEMS micromirrors*. Microelectronics Reliability, 50:1383–1387, 2010.
- [10] S. Sangameswaran, J. De Coster, D. Linten, M. Scholtz, S. Thijs, G. Groeseneken, and I. De Wolf. *Investigating ESD sensitivity in electrostatic SiGe MEMS*. Journal of Micromechanics and Microengineering, 20(5):055005, 2010.
- [11] J. De Coster, X. Rottenberg, S. Sangameswaran, P. Ekkels, H. A. C. Tilmans, and I. De Wolf. *Robustness of electrostatic MEMS actuators*

against electrical overstress. In TRANSDUCERS 2009, Denver, CO, USA, 2009.

[12] <http://www.ti.com/>. *DLP 0.17 HVGA DDR Series 210 DMD.*

4

'PIPO'-SiGe-microspiegels

Als inleiding van dit hoofdstuk lichten we in Sectie 4.1 begrippen toe als 'de-gammaverwerking' en 'contoureffect.' Het contoureffect is een van de voornaamste nadelen van DLP-projectie. De digitale PWM-werking van de DMD-spiegels geeft voor de lage intensiteitswaarden een ondermaatse kwantisatie. Dit leidt tot duidelijke overgangen of contouren op het beeld. In Sectie 4.2 stellen we de uitvinding van de 'PIPO' (*Pull In Pull Out*)-microspiegel voor die via analoge PWM onder meer dit contourprobleem kan aanpakken. De spiegel bevat 4 actuatie-elektrodes, waarvan twee worden aangestuurd met hoge spanningsvormen gemeenschappelijk voor de hele spiegelmatrix. De andere twee worden vanuit de onderliggende elektronische laag voorzien van CMOS-compatibele DC-spanningen. We bespreken er het werkingsprincipe en de voordelen. Via simulatie onderzoeken we de 'PIPO'-werking van een $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMI-SiGe-'PIPO'-microspiegel (zie Sectie 4.3). We gaan op zoek naar de gewenste hoge spanningsvormen voor de gemeenschappelijke elektrodes en onderzoeken vervolgens de 'PIPO'-werking in functie van de twee DC-spanningen.

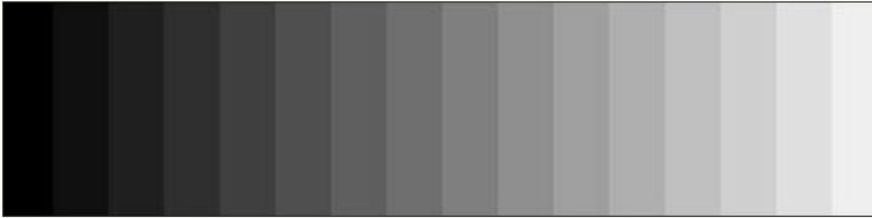
Met behulp van de LDV-opstelling in imec verifiëren we de variabiliteit van de *pull-in*- en *pull-out*-spanning, hoe de 'PIPO'-spiegel in één ruk kan schakelen tussen de uiterste toestanden en hoe de DC-spanningen invloed uitoefenen op het schakelmoment per periode.

Tenslotte karakteriseren we de $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ -SiGe-'PIPO'-microspiegel. In Sectie 4.5 beschouwen we de CMOS-compatibiliteit, schakeltijd, resolutie en de invloed van de fluctuerende spanningen op het zogenoemde pis-

toneffect.

Indien niet anders verwezen, werden alle metingen in dit hoofdstuk door ons uitgevoerd.

4.1 Grijsverdeling



Figuur 4.1: Afbeelding met 16 grijswaarden volgens een lineaire perceptuele helderheidsverdeling.

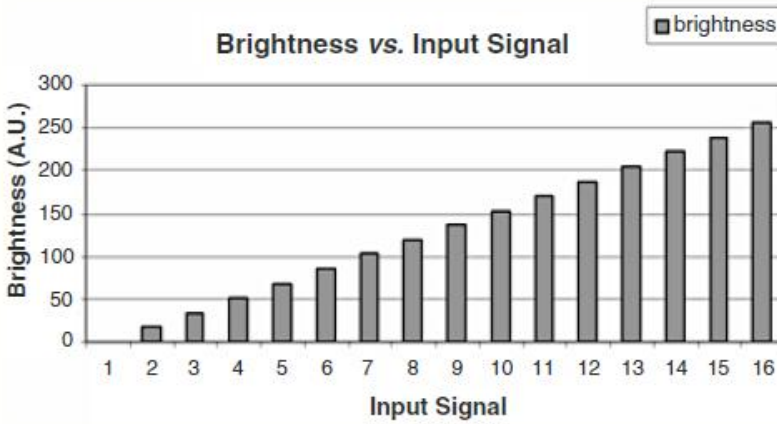
Een ideale grijsverdeling voor displays geldt als de gebruiker een lineaire grijsverdeling ervaart. Deze perceptuele helderheid B (Eng. *brightness*) dient met gelijke stappen toe te nemen, zoals geïllustreerd in Figuur 4.1. De luminantie L (Eng. *luminance*) of de lichtsterkte per oppervlakteenheid wordt echter niet lineair ervaren door het menselijk oog en brein. De ervaren helderheid B heeft een niet-lineaire afhankelijkheid van de luminantie L waarbij het menselijk oog en brein gevoeliger is voor donkere dan lichtere tintverschillen. Een benadering hiervoor is een derdemachtswortelrelatie:

$$B \sim L^{1/3} \quad (4.1)$$

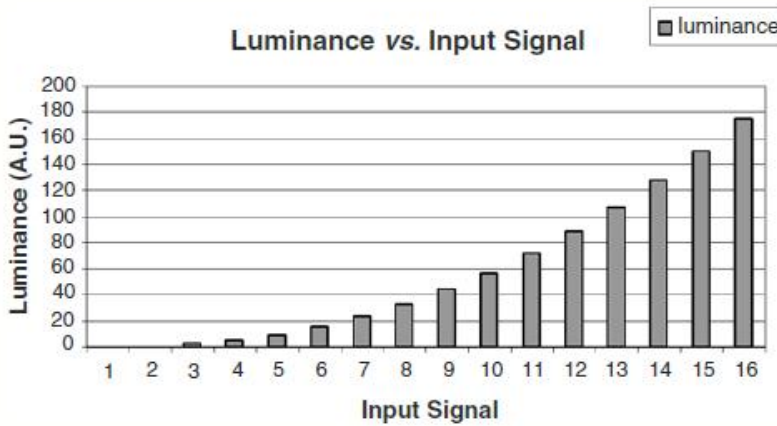
In Figuur 4.2 wordt een helderheidsdistributie getoond voor een grijsverdeling met 16 ingangswaarden [1]. Om dit te verkrijgen hebben we een niet-lineair verloop van de luminantie nodig voor toenemende grijswaarden. Figuur 4.3 geeft dit weer. Uiteraard is een distributie met 16 grijswaarden wat beperkt voor kwalitatieve displays. Typisch is een verdeling met 256 grijswaarden (i.e. 8-bit-resolutie).

4.1.1 Gamma

Voor displays is het van belang een lineaire perceptuele helderheid weer te geven en dit dus te bewerkstelligen via een elektro-optische transferfunctie die de niet-lineaire correctie voor oog en brein implementeert. Deze correctie volgt een machtwet. De nodige luminantie L is ruwweg proportioneel met het ingangsgrijswaarde V tot de macht γ :



Figuur 4.2: Lineaire helderheidsverdeling voor 16 ingangswaarden [1].

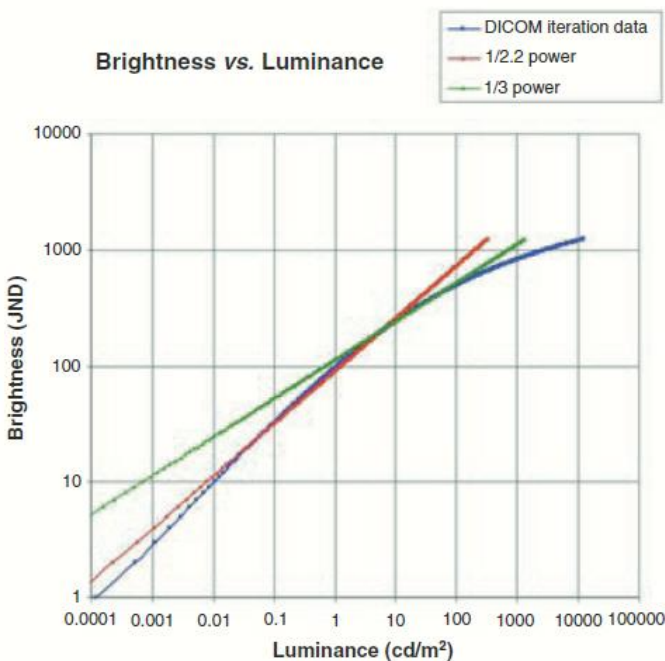


Figuur 4.3: Niet-lineaire luminantieverdeling voor 16 ingangswaarden opdat de helderheidsverdeling lineair verloopt zoals in Figuur 4.2 [1].

$$L \sim V^\gamma \quad (4.2)$$

De term γ of 'gamma' stamt uit de beginjaren van de CRT. Eigen aan de kathodestraalbuis is dat deze inherent de gamma-relatie in vergelijking 4.2 uitvoert. Tegenwoordig wordt zo een gamma-relatie nog steeds uitgevoerd door de meeste displays. Indien we nu analoog aan vergelijking 4.1 $\gamma=3$ kiezen, verkrijgen we benaderd een lineaire perceptuele helderheidsverdeling. Een typisch gekozen gammawaarde γ ligt tussen 2.2 en 3.

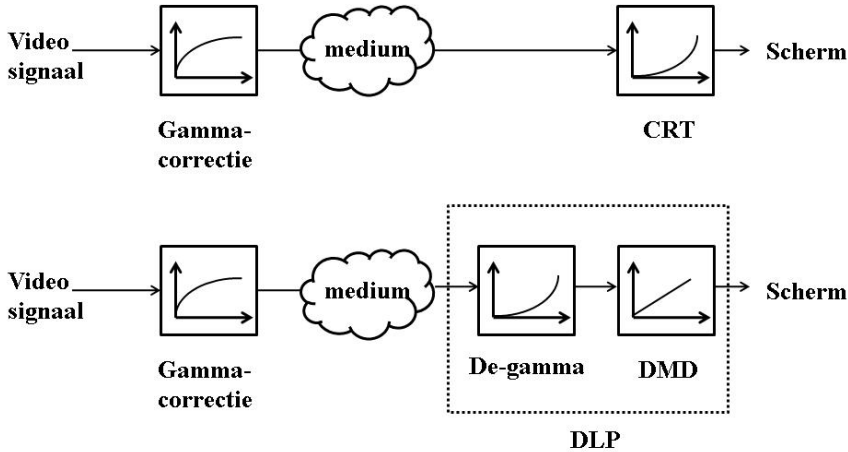
Voor medische displays zijn er strengere ontwerpeisen. De vereenvoudigde gammarelatie is bijgevolg niet voldoende. Daartoe wordt de veel nauwkeurigere DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*)-standaard gebruikt. Deze is gebaseerd op empirische resultaten. Figuur 4.4 toont deze standaard tesamen met de 1/2.2- en 1/3-machtsrelatie voor de perceptuele helderheid in functie van de luminantie.



Figuur 4.4: B-L-relatie voor 1/2.2-, 1/3-machtsrelatie en de DICOM-standaard [1].

Deze gamma-relatie wordt bij DLP (zie Sectie 1.3.1.5) uitgevoerd door het zogenoemde 'de-gamma'-proces. Doordat de werking van de DMD-matrix inherent een lineaire grijsverdeling geeft, dienen de grijswaarden

eerst omgerekend te worden volgens een 'de-gammaprofiel' alvorens door de spiegels te worden uitgevoerd. Dit betekent dat meer grijsniveaus bij de donkere tinten nodig zijn en minder voor de lichtere tinten. Figuur 4.5 illustreert deze de-gamma-verwerking ten opzichte van CRT.



Figuur 4.5: Schematische voorstelling van de-gamma-verwerking bij DLP t.o.v. CRT.

4.1.2 Contoureffect

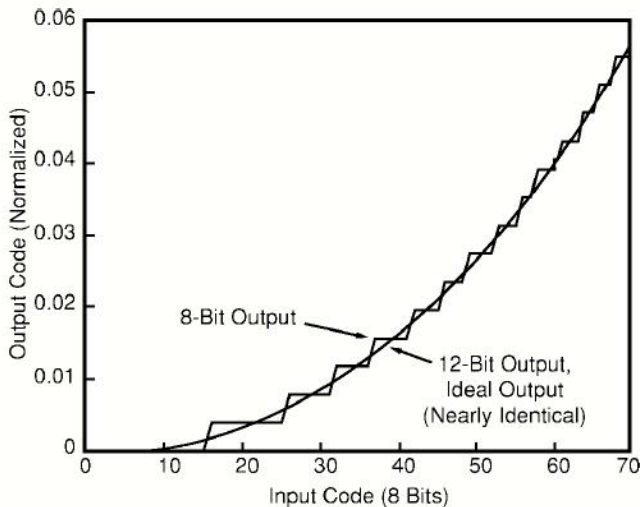


Figuur 4.6: Standaard binair gewogen PWM bij DMD [2].

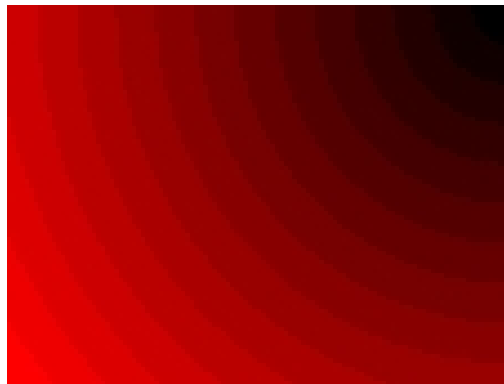
In 1.3.1.4 vermeldten we al dat de DMD aangestuurd wordt via digitale PWM. Standaard wordt binair gewogen pulsbreedtemodulatie (PWM) toegepast. Hierbij zijn de *subframe*-periodes opgesplitst volgens een binaire verdeling. De *bitplanes* voor een 8-bit-verdeling worden geïllustreerd in Figuur 4.6. Op die manier kunnen $2^n = 2^8 = 256$ intensiteitsniveaus worden bereikt. In het geval van een kleursequentieel DLP-systeem, dient elke *kleurframe* binnen de $16.67\text{ms} / 3 = 5.56\text{ms}$ gehouden te worden. Voor 256 grijsniveaus per subframe betekent dit voor het kleinste beduidende bit een periode van $5.56\text{ms} / 256 = 21.7\mu\text{s}$. Het is duidelijk dat door de eindige

snelheid van de DMD-spiegels het niet evident is het aantal discrete niveaus per subframe op te drijven.

Indien we de donkere grijswaarden bekijken voor een 8-bit-resolutie zien we dat de kwantisatie ondermaats is voor deze waarden (zie Figuur 4.7). Dit leidt tot het zogenoemde contoureffect. Bij de donkere gebieden op het beeld duiken duidelijke afgelijnde contouren op, wat het resultaat is van povere kwantisatie. Een eerste oplossing om dit te verhelpen is de uitgangsverresolutie verhogen. Een 12-bit-resolutie staat ook afgebeeld in Figuur 4.7. Dit geeft de nodige extra grijsniveaus voor de donkere grijsniveaus. Voor de lichtere tinten zijn er bijgevolg ook extra niveaus ook al zijn die overbodig. Zo'n oplossing is echter vrij duur. Een tweede oplossing is *dithering*. Hierbij worden de grijswaardes voor pixels in een bepaald gebied 'uitgesmeerd' om de scherpe randen of contouren te mijden. Figuur 4.8 vergelijkt hetzelfde (rood)beeld met ongewenste contouren bij een lage 4-bit-resolutie, samen met de *dithering*-oplossing bij eenzelfde resolutie en het beeld voor een hogere 8-bit-resolutie. Een andere oplossing is het toepassen van analoge PWM. Op die manier kunnen de lage intensiteitsniveaus beter worden gequantiseerd. Ook kunnen de niveaus verdeeld worden zodat bij eenzelfde resolutie meer donkergrijze niveaus worden geselecteerd in vergelijking met een binaire verdeling.



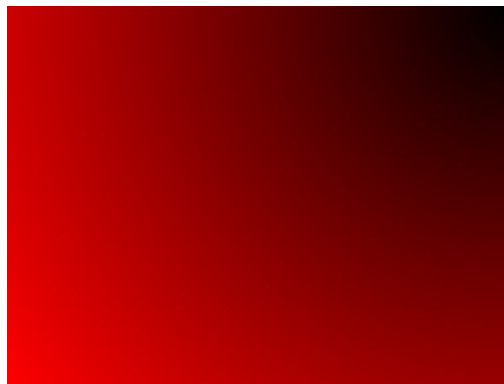
Figuur 4.7: *Quantisatie voor lage intensiteitswaarden bij 8-bit- en 12-bit-uitgangsverresolutie [2].*



(a)



(b)



(c)

Figuur 4.8: Afbeelding met intensiteitsovergang voor 4-bit-resolutie met ongewenste contouren (boven), met dithering (midden) en voor 8-bit-resolutie (onder).

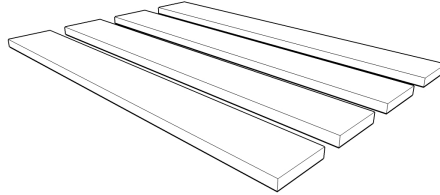
4.2 'PIPO'-microspiegel

We stellen een nieuwe microspiegel voor, de 'PIPO' (*Pull In Pull Out*)-microspiegel, waarbij analoge PWM wordt uitgevoerd. Hoge aanstuurspanningen worden afgesplitst van andere lagere werkspanningen. Deze laatste zouden we binnen een bereik willen kiezen aanvaardbaar voor standaard onderliggende elektronica zoals CMOS (bijvoorbeeld een 5V-spanningsbereik). Ideaal zou zijn dat deze voorzien worden via een actieve matrix. Deze DC-spanningen dienen de verhouding tussen de twee ingeklapte toestanden in de tijd of de *duty cycle* te bepalen en zo ook de grijswaarde van de spiegel.

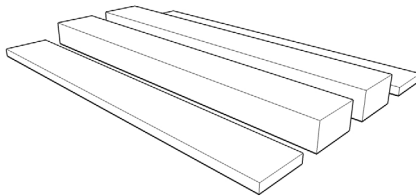
4.2.1 Variabele pull-in

Om invloed te kunnen uitoefenen op de *duty cycle* van de spiegel, dienen we invloed te hebben op de *pull-in*-spanning van de microspiegel. Door twee extra elektrodes per spiegel aan te brengen, worden twee extra vrijheden voorzien. We definiëren de *pull-in*-spanning aan een zijde van de spiegel als de spanning op de buitenste elektrode aan dezelfde zijde waarbij de spiegel inklapt. Door de spanning op de aanliggende extra elektrode te variëren, hopen we de *pull-in*-spanning te beïnvloeden. Figuur 4.9 toont deze elektrodeconfiguratie van vier actuatie-elektrodes die tussen de twee landingelektrodes van de microspiegel liggen. Met behulp van het simulatieprogramma *Comsol* gaan we voor één zijde de invloed van de *pull-in*-spanning als functie van de extra elektrode na. De curve '0.0 μm -elektrode' uit Figuur 4.11 toont voor een Al-microspiegel met zijde 9.4 μm dat bij stijgende spanning op de extra elektrode de *pull-in*-spanning een geringe daling ondergaat. Gelijkaardig aan het concept van de graduele elektrodes kunnen we gebruik maken van de extra ruimte centraal onder de spiegel. Zo kunnen we de binnenste extra elektrodes hoger kiezen zoals bij de elektrodeconfiguratie in Figuur 4.10. Na simulatie op dezelfde microspiegel met de binnenste elektrodes 0.2 μm hoger, verkrijgen we een veel sterkere spanningszwaai van de *pull-in*-spanning (zie curve '0.2 μm -elektrode' uit Figuur 4.11). Door een extra verhoogde elektrode onder de spiegel te voorzien, verkrijgen we een variabele *pull-in*-spanning.

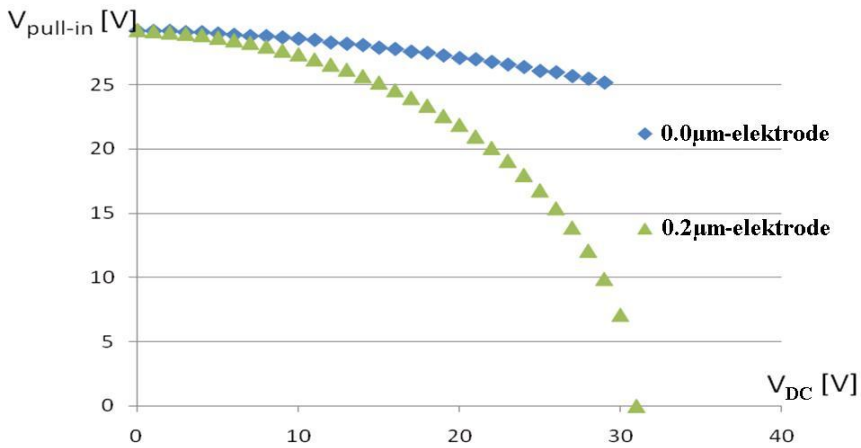
Het nieuwe microspiegelconcept is geïnspireerd op deze simulatie (zie Figuur 4.11). De volgende subsecties bespreken de gedachtegang die we hebben gemaakt om te komen tot het 'PIPO'-microspiegelidee.



Figuur 4.9: Aanstuurconfiguratie met vier even hoge elektrodes.



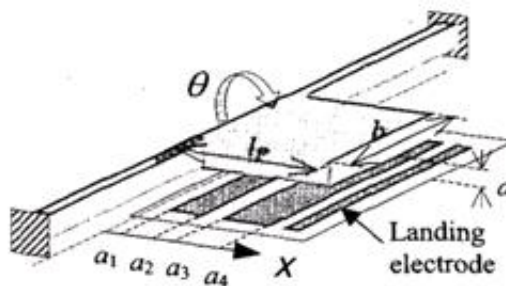
Figuur 4.10: Aanstuurconfiguratie met twee binnenste elektrodes hoger dan de buitenste.



Figuur 4.11: Pull-in-spanning in functie van de extra elektrodespanning V_{DC} .

4.2.2 Uitvinding

In [3] wordt gewag gemaakt van een instelbare microspiegel. Deze enkelzijdige microspiegel bevat naast de landingelektrode twee actuatielektrodes op gelijke hoogte (zie Figuur 4.12). De actuatie gebeurt door twee in-fase driehoeksgolven waarbij de onderlinge amplitudeverhouding β de *duty cycle* bepaalt. Echter, om een display te creëren op basis van deze microspiegel, is het aanstuurmechanisme heel moeilijk in te voeren in een spiegelmatrix. Per pixel zou men een individuele driehoeksvorm moeten voorzien. Door de veelheid aan microspiegels in de matrix is dit praktisch onmogelijk te implementeren.



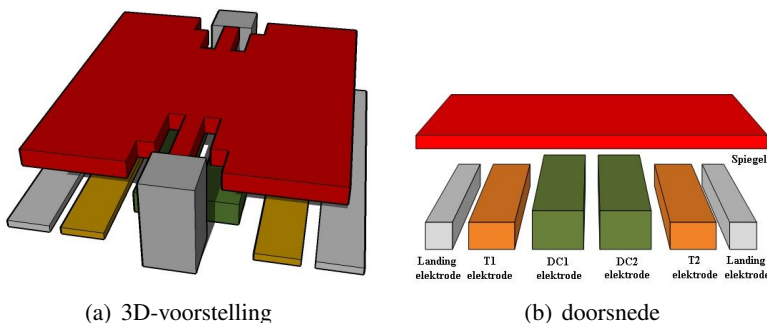
Figuur 4.12: Schematische voorstelling van de instelbare microspiegel voorgesteld in [3].

In de literatuur wordt in [4] het idee van analoge PWM-aansturing

voor DMD-spiegels opgeworpen. Hierbij wordt een analogo ingangssignaal dat de gewenste pixelintensiteit representeert, gesynchroniseerd met een *address*-signaal om de pixelinformatie op te laden op een ingangscondensator. Een *frame*-signaal zorgt voor de overdracht van deze spanning naar een tweede condensator. Verder 'vergelijkt' de transistorschakeling een stijgende spanning met de spanning op de tweede condensator, wat resulteert in een PWM-uitgangssignaal voor de microspiegelelektrodes. Door toepassing van analoge PWM reduceert men *data rates*, beeldverwerkings*hardware* en -geheugen in vergelijking met de standaard digitale PWM-aansturing van DMD's [4]. Dit ontwerp vergt ten minste zes transistoren per microspiegel en is moeilijk of niet realiseerbaar. Doordat het spiegeloppervlak zeer beperkt is, is het voorzien van zo'n analogo PWM-circuit geen sinecure.

De 'PIPO'-microspiegel die wij voorstellen, is weergegeven in Figuur 4.13. Ze bevat zes elektrodes waarvan de uiterste twee de landingelektrodes zijn. Deze krijgen bijgevolg dezelfde potentiaal als de spiegel. De vier andere vormen de actuatielektrodes, waarbij de middelste twee elektrodes hoger zijn.

Indien de DC-spanningen de pixelintensiteit bepalen, zou het mogelijk zijn dat deze spanningen worden voorzien via een onderliggende actieve matrix. De binnenste 'DC'-elektrodes hebben dan elk een MOSFET-schakelaar die hun kolom-busbar verbindt met een opslagcondensator (drain) als de overeenkomstige rij (gate) hoog is. De condensator wordt opgeladen tot de analoge DC-spanning die constant blijft gedurende een halve periode zoals in Figuur 4.15. Een actieve matrixcel voor één microspiegel (met zijde A en B) is weergegeven in Figuur 4.14.



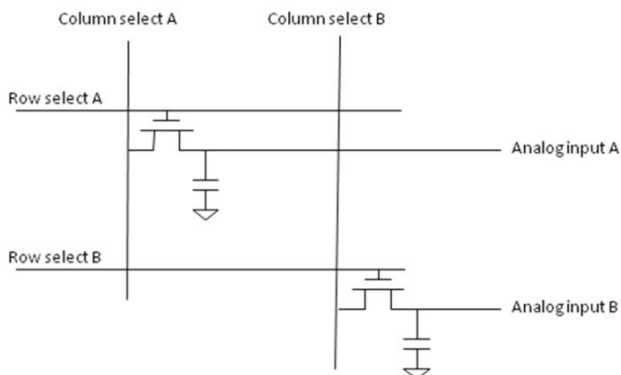
Figuur 4.13: Voorstelling van de nieuwe 'PIPO'-microspiegel.

Dit 'PIPO'-ontwerp gaat verder dan [3]. De microspiegel is roteerbaar

langs twee zijden (met een grotere spiegelhoek tot gevolg) en in plaats van een instelbare driehoeksspanning krijgt één van de twee actuatiespanningen per zijde een DC-spanning. Op die manier kunnen de vele spiegeltjes via een haalbare manier aangestuurd worden, i.e. met behulp van een actieve matrix in de onderliggende elektronische laag.

In het microspiegelontwerp dat wij voorstellen gebeurt de analoge PWM niet op CMOS-niveau, maar op MEMS-niveau. We spreken dan eerder van elektromechanische PWM. Die gebeurt namelijk op MEMS-niveau zonder nood aan extra 'vergelijkende' elektronische schakelingen in de CMOS-laag eronder. De restrictie op spiegelgrootte door het transistoroppervlak is bijgevolg minder streng voor ons ontwerp. Voor de 'PIPO'-microspiegel volstaan twee transistoren per microspiegel in plaats van minimum zes bij [4].

Voor deze uitvinding werd een patentaanvraag ingediend [5]. Het patent is inmiddels gepubliceerd (nog niet toegekend).



Figuur 4.14: Schema van een actieve matrixcel corresponderend met één microspiegel.

Zoals vermeld in Sectie 4.1 worden equidistante video-datawaarden afgebeeld op luminantiewaarden die gedistribueerd zijn volgens een machtwet. Dit betekent dat de luminantiewaarden voor lage datawaarden dicht bij elkaar staan, terwijl de hogere datawaarden minder dicht gedistantieerd staan. Het is zo dat meer niveaus nodig zijn dan 256 om perceptueel 256 (8-bit) equidistante grijsniveaus te bekomen. In veel DMD-gebaseerde projectoren, vooral kleursequentiële en met een enkele DMD-chip, is het ontoereikend om alle grijsniveaus te reproduceren. Dit leidt typisch tot duidelijke contouren bij de donkere tinten. Ons nieuw microspiegelontwerp maakt het ook mogelijk analoge gamma-compensatie te implementeren door de uitgangsniveaus zo te kiezen dat ze een gammacurve volgen. Dit is haal-

baar want ze kunnen arbitrair gekozen worden. Om dezelfde reden is er geen inherente quantisatie in het aantal beschikbare uitgangsniveaus. Bijgevolg kan het contoureffect uitgeschakeld en beeldverwerkingshardware en -geheugen gereduceerd worden.

Door de noodzakelijke hoge spanningen, die gemeenschappelijk zijn voor alle spiegels van de matrix, af te splitsen van de DC-spanningen die worden voorzien vanuit de actieve matrix in de elektronica, is het mogelijk de spanningswaarden zo te selecteren dat ze binnen een bereik liggen dat aanvaardbaar is voor de CMOS eronder. Bijgevolg zouden we met een CMOS-compatibele aansturing de microspiegelmatrix kunnen laten functioneren.

Bovendien zouden we, weliswaar met behulp van uitbreiding van hardware en geheugen, het probleem van niet-uniformiteit kunnen aanpakken. Doordat microspiegels uit eenzelfde matrix zich niet identiek gedragen, zouden niet-uniforme pixels een vast spatiaal ruispatroon of *fixed pattern noise* induceren op het beeld. Zo zou een opzoektabel met aangepaste uitgangswaarden per spiegel hiertoe een oplossing kunnen bieden. Via een soort initiële calibratie zouden de microspiegels dan ingesteld kunnen worden om uniforme intensiteitswaarden voor de hele spiegelmatrix te vertonen.

4.2.3 Werkingsprincipe

Eerder als een *educated guess* vertrekken we van het rechttoe-rechtaan aanstuurschema zoals in Figuur 4.15. De buitenste dunne actuatie-elektrodes krijgen de spanningen V_{T1} en V_{T2} . Deze zijn twee tegenfase driehoeksgolfvormen. De binnenste dikke elektrodes krijgen de spanningen V_{DC1} en V_{DC2} . Dit zijn DC-spanningen per halve periode. Hierbij staan 1 en 2 elk voor een zijde van de microspiegel. De resulterende spiegelhoek α toont het verwachte gedrag van de spiegel.

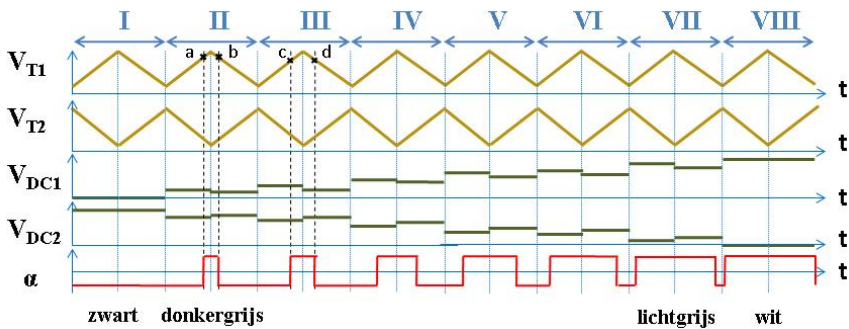
Tijdens periode I kiezen we V_{DC1} hoog genoeg, terwijl V_{DC2} laag is. Dit zorgt ervoor dat de spiegel direct inklapt naar zijde 1 en gedurende de gehele periode aan deze kant blijft.

In de eerste helft van periode II is V_{DC2} gedaald, terwijl V_{DC1} gestegen is ten opzichte van periode I. Door de verandering in DC-spanningen klapt de spiegel uit op tijdstip 'a' aan zijde 1. We dienen V_{DC1} zo te kiezen dat *pull-out* optreedt op tijdstip 'a' of dat de *pull-out*-spanning voor zijde 1 tijdens deze halve periode per definitie overeenkomt met de spanning van V_{T1} op tijdstip 'a'. Wanneer de DC-spanning aan zijde 2 nu zo gekozen wordt dat *pull-in* optreedt aan zijde 2 op hetzelfde tijdstip 'a', zal op dat moment de microspiegel onmiddellijk van de ene kant naar de andere kant

omkantelen en dus inklappen naar zijde 2. We definiëren de spanning van de V_{T2} op tijdstip 'a' als de *pull-in*-spanning voor deze halve periode. Voor de tweede helft van periode II wordt V_{DC1} verlaagd en V_{DC2} verhoogd. De spiegel klappt nu uit op punt 'b' van zijde 2 en tegelijkertijd klappt de spiegel in aan de andere zijde 1. Door elke halve periode de *pull-in*- en *pull-out*-spanning te combineren, kantelt de spiegel tussen de twee zijdes.

In periode III, zijn de DC-spanningen V_{DC1} en V_{DC2} in die zin veranderd dat de microspiegel vroeger van zijde 1 naar zijde 2 kantelt tijdens de eerste helft van de periode, namelijk op tijdstip 'c'. Voor de tweede helft van periode III keert de microspiegel later terug, namelijk op tijdstip 'd', naar zijde 1.

Voor de volgende periodes gaat dit verder op een analoge manier. Voor de laatste periode VIII, zijn V_{DC1} en V_{DC2} respectievelijk hoog en laag genoeg zodat de microspiegel direct naar zijde 2 omslaat en daar blijft gedurende de gehele periode.



Figuur 4.15: 'Rechttoe-rechtaan' 'PIPO'-aanstuurschema met de elektrodespanningen V_{T1} , V_{T2} , V_{DC1} en V_{DC2} en de resulterende spiegelhoek α .

Als we nu alles op het projectieniveau bekijken en zijde 1 associëren met de spiegelkant waar licht reflecteert naast de lens, komt zijde 1 overeen met de 'zwarte zijde'. Zijde 2 ('witte zijde') komt bijgevolg overeen met de spiegelkant waarbij licht gereflecteerd wordt door de lens en zo een witte pixel teweegbrengt. Als we het verwachte gedrag van de spiegelhoek α bekijken, zien we de pulsbreedtemodulatie van de spiegel. Periode I resulteert in een zwart pixel op het scherm. Voor de opvolgende periodes komt er een steeds groter gedeelte wit door de lens terecht. Zo verkrijgen we voor periode II een donkergrijze pixel, met opvolgend een steeds lichtere pixel tot de lichtgrijze pixel voor periode VII. Periode VIII krijgt het maximale gereflecteerd licht door de lens. Deze periode associëren we met een witte pixel. Deze werking noemen we 'PIPO' (*Pull-In Pull-Out*)-werking naar

de samenwerking van *pull-in* en *pull-out* om de spiegel te laten schakelen tussen de twee uiterste toestanden. We verkrijgen zo een analoge PWM op de spiegelhoek α .

4.3 Simulaties

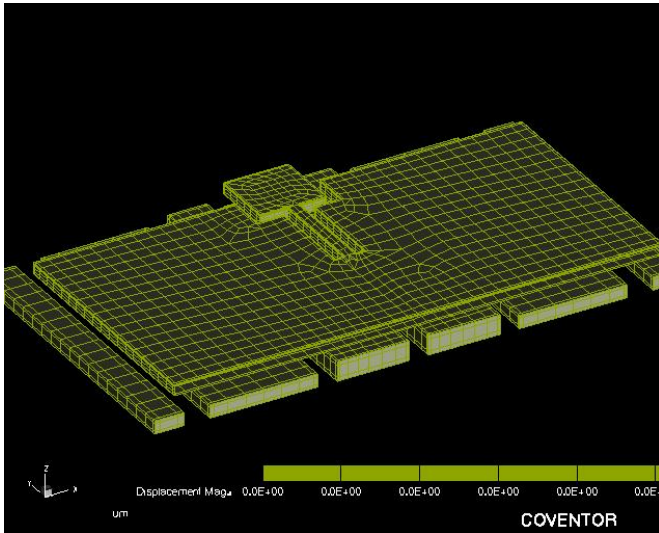
In deze sectie zullen we de geldigheid van het voorgestelde werkingsprincipe in Sectie 4.2.3 verifiëren via simulaties op een $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMI-'PIPO'-microspiegel. We beschouwen de mogelijkheid om V_{PI} en V_{PO} te variëren en enkele verbeteringen voor de gemeenschappelijke spanningsvormen, om uiteindelijk te komen tot het 'PIPO'-schakelen van de spiegel tussen de uiterste toestanden.

4.3.1 Variabele pull-in en pull-out

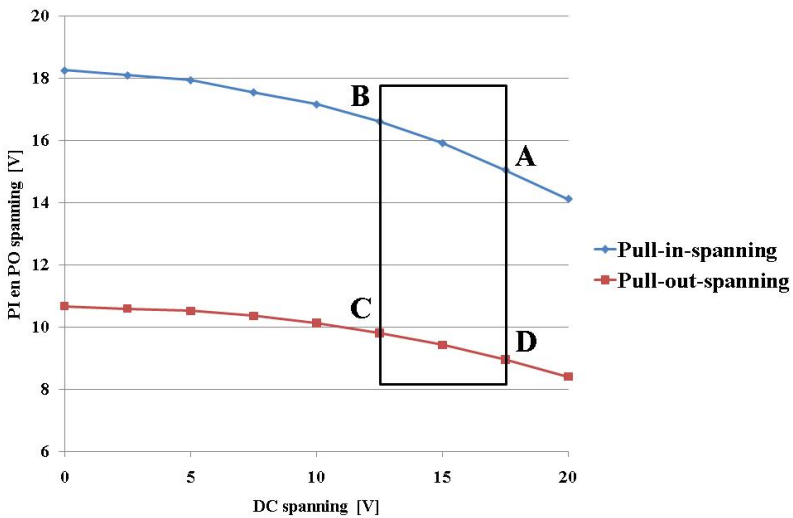
In een latere fase van het onderzoek beschikten we ook over het *Coventor* simulatieprogramma, waarbij het mogelijk werd ook *pull-out*-spanning te simuleren. In Figuur 4.16 zie je het 'PIPO'-spiegelmodel waarop de volgende simulaties werden uitgevoerd. Deze $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ -'PIPO'-microspiegel werd aan zijde 1 aangestuurd. De elektrodes aan de andere zijde werden op dezelfde potentiaal als de spiegel geplaatst, namelijk 0V. Voor verschillende spanningswaarden V_{DC1} werd de *pull-in*- en *pull-out*-spanning gesimuleerd of dus de overeenkomstige spanningswaarde V_{T1} . Figuur 4.17 toont dat V_{PI} daalt op een vergelijkbare manier als bij Figuur 4.11. In de vorige sectie werd stilzwijgend aangenomen dat de *pull-out*-spanning V_{PO} ook beïnvloedbaar is door spanning V_{DC1} . Met deze simulatie is het duidelijk dat zowel V_{PI} als V_{PO} een spanningszwaai vertonen bij toenemende V_{DC1} . Hoe hoger deze waarde hoe sterker de daling en bijgevolg de spanningszwaai.

4.3.2 Geoptimaliseerd aanstuurschema 1

Als we een blik werpen op Figuur 4.17 valt op te merken dat een driehoeksgolfvorm niet de beste optie is als gemeenschappelijke golfvorm. Indien de maximale DC-spanning 20V bedraagt, zal *pull-in* optreden voor V_T tussen 14.1V en 18.2V en *pull-out* tussen 8.4V en 10.7V. Hierdoor is in één ruk schakelen tussen uiterste toestanden niet mogelijk voor alle tijdstippen per periode. Dit leidt tot het geoptimaliseerde aanstuurschema uit Figuur 4.18. Hiervoor selecteren we voor de stijgende helling van de gemeenschappelijke driehoeksgolven enkel de spanningswaarden van de *pull-in*-spanningszwaai. Voor de dalende hellingen van V_{T1} en V_{T2} kiezen we



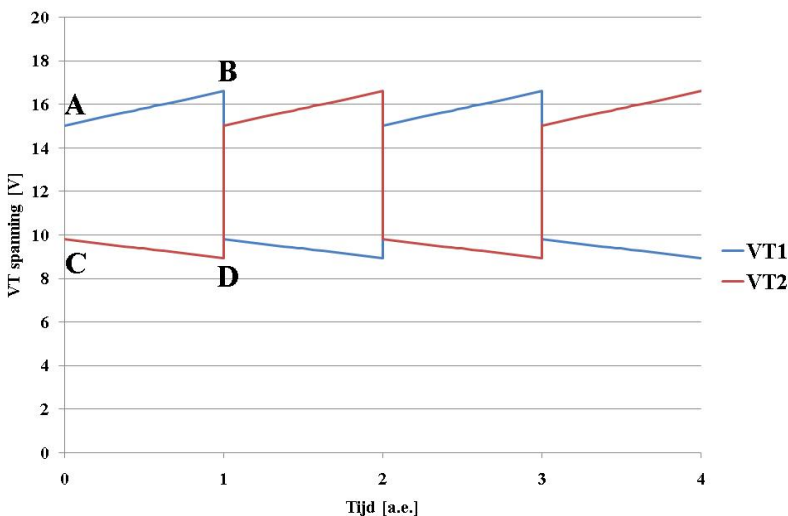
Figuur 4.16: $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ -PIPO'-spiegelmodel in het simulatieprogramma Coventor.



Figuur 4.17: Gesimuleerde V_{PI} en V_{PO} in functie van de extra DC-elektrodespanning V_{DC} .

de spanningswaarden uit de *pull-out*-spanningszwaai. Op die manier zijn we veel eerder in staat de volledige 100% *duty cycle* PWM te beslaan.

Om de DC-waarden binnen een bepaald spanningsbereik te houden, compatibel met de onderliggende elektronica, kiezen we arbitrair voor een 5V-bereik wat een aanvaardbare keuze is voor bijvoorbeeld standaard CMOS-technologie. Een translatie van spanningswaarden op de spiegels levert immers eenzelfde spiegelwerking op doordat de elektrostatische aantrekking en bijgevolg het spiegelgedrag steunt op spanningsverschillen tussen de verschillende entiteiten. Om tegelijkertijd te genieten van sterk variërende *pull-in*- en *pull-out*-spanningen, kiezen we voor de verdere simulaties voor een centrale spanningswaarde van 15V. De DC-werkspanningen worden bijgevolg gekozen uit het [12.5V - 17.5V]-bereik. Voor een goed gemotiveerd aanstuurschema selecteren we de helling voor *pull-in* tussen de overeenkomstige punten A en B uit Figuur 4.17. Voor de dalende flanken nemen we de spanningswaarden C en D uit Figuur 4.17 als uiterste punten. Het resultaat is twee zaagtandgolfformen in tegenfase.



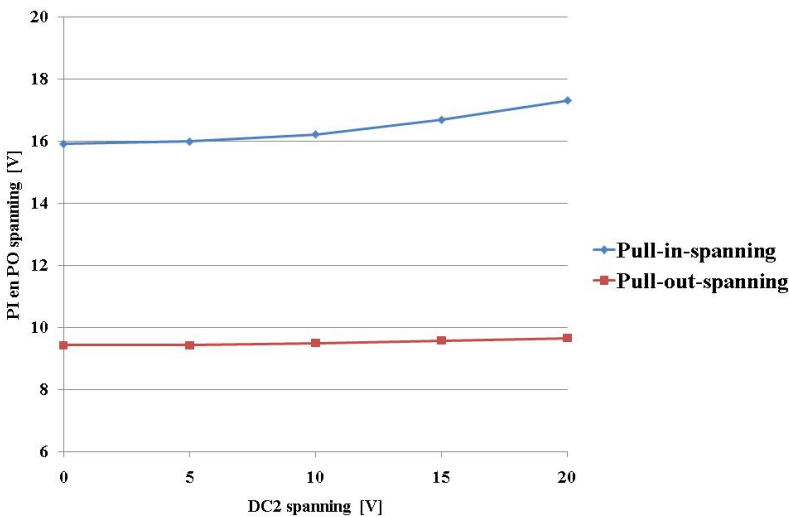
Figuur 4.18: Zaagtandspanningen V_{T1} en V_{T2} van het geoptimaliseerd aanstuurschema 1.

4.3.3 Invloed van tegenelektrodes

Tot hier toe zijn we er van uitgegaan dat elke spiegelzijde onafhankelijk functioneert van de andere zijde van de overeenkomstige 'PIPO'-microspiegel. We gaan nu na in hoeverre de elektrodes liggend aan de an-

dere zijde of 'tegenelektrodes' invloed hebben op de spiegelzijde waarvan sprake. Dit is immers cruciaal alvorens we de haalbaarheid van 'PIPO'-werking verder willen nagaan via simulatie.

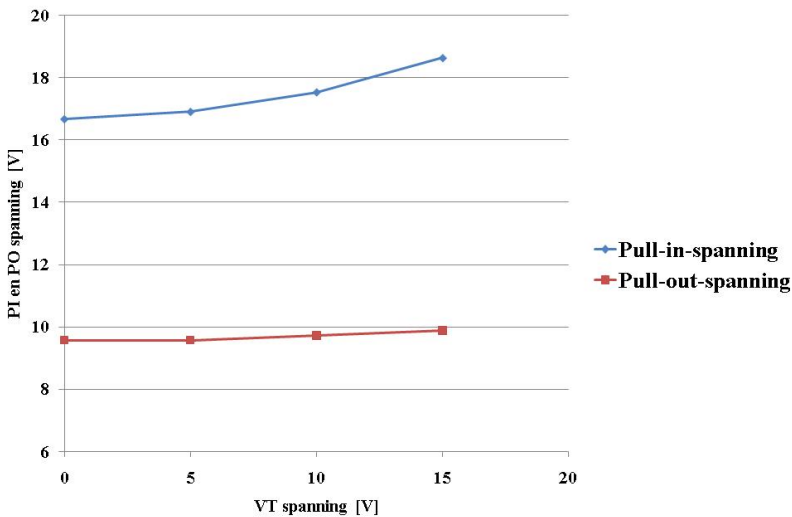
In een eerste stap simuleren we de invloed van V_{DC2} op de 'PIPO'-werking aan zijde 1. Figuur 4.19 toont de *pull-in*- en *pull-out*-spanning aan zijde 1 voor het centraal werkpunt, i.e. $V_{DC1} = 15\text{V}$, met oplopende V_{DC2} -spanning. Voor deze simulatie stellen we V_{T2} in op 0V . We herkennen een sterkere stijging van de *pull-in*-spanning bij stijgende V_{DC2} tegenover een geringe vermeerdering voor de *pull-out*-spanning. De achterliggende verklaring hiervoor ligt in de beginpositie van de microspiegel die voorafgaat aan de respectievelijke *pull-in* en *pull-out*. Voor de *pull-out*-situatie is dit uiteraard de ingeklapte toestand, de spiegel bevindt zich in de uiterste toestand aan zijde 1. Op die manier is de afstand tussen de spiegel en de V_{DC2} -elektrode maximaal en bijgevolg is de mutuele invloed op de 'PIPO'-werking aan zijde 1 minimaal. Voor de *pull-in*-situatie echter, bevindt de microspiegel zich in een nog niet ingeklapte en dus intermediaire toestand waarbij de spiegel overheelt naar zijde 1. De afstand tussen de spiegel en V_{DC2} -elektrode is kleiner dan bij de vorige situatie en bijgevolg is de mutuele invloed van de DC-tegenelektrode sterker op de *pull-in*-spanning dan op de *pull-out*-spanning.



Figuur 4.19: Gesimuleerde V_{PI1} en V_{PO1} in functie van de DC-tegenelektrodespanning V_{DC2} met $V_{DC1} = 15\text{V}$.

Om een volledig beeld te vormen, controleren we nu ook de invloed van de V_{T2} op de 'PIPO'-werking aan zijde 1. We kiezen V_{DC1} en V_{DC2} gelijk

aan 15V overeenkomstig het centrale werkpunt in ons arbitrair gekozen spanningsbereik. Figuur 4.20 toont analoog met Figuur 4.19 de invloed van stijgende V_{T2} -spanning op de *pull-in*- en *pull-out*-spanning aan zijde 1. De invloed op *pull-in* geeft terug een sterkere invloed dan op *pull-out*. Ook hier speelt de afstand tussen spiegel en V_{T2} -elektrode bij de beginpositie die voorafgaat aan *pull-in* of *pull-out*.

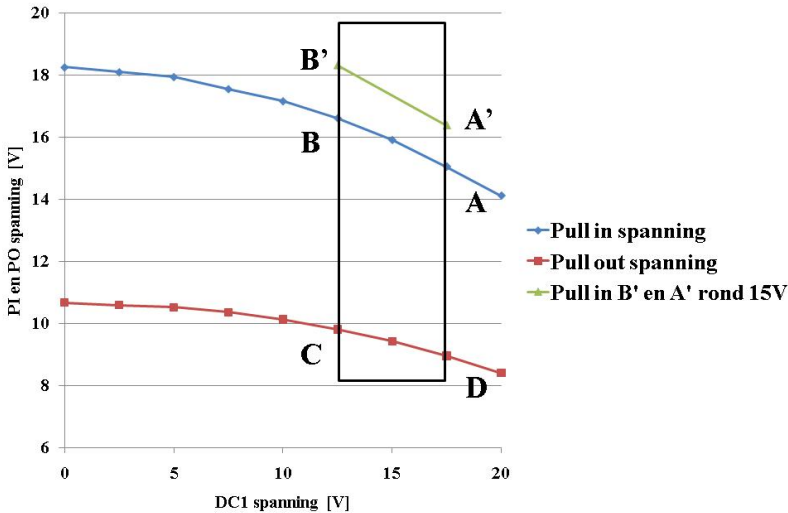


Figuur 4.20: Gesimuleerde V_{PI1} en V_{PO1} in functie van de zaagtand-tegenelektrodespanning V_{T2} met V_{DC1} en $V_{DC2} = 15V$.

4.3.4 Geoptimaliseerd aanstuurschema 2

Uit de vorige subsectie concluderen we dat de invloed van de tegenelektrodes op *pull-in* niet verwaarloosbaar is. Indien we de invloed op *pull-out* negeren, beschikken we over een methode om de gemeenschappelijke zaagtandvormen verder te optimaliseren. Hiertoe trachten we nieuwe waarden voor A en B, namelijk A' en B', te vinden via simulatie. Het punt A voor bijvoorbeeld V_{T1} komt overeen met het moment dat de tegenfase-zaagtandfunctie V_{T2} de waarde C heeft. Indien we op dit moment van de overeenkomstige periode de spiegel willen laten schakelen, willen we in eerste instantie dat dit geldt voor de DC-spanningen in de uiterste waarden van het spanningsbereik. Bijgevolg bekommen we voor V_{DC1} de waarde 17.5V en voor V_{DC2} 12.5V. De *pull-in*-spanning die we simuleren voor zijde 1, terwijl V_{T2} gelijk is aan de waarde C, ligt hoger dan A en wordt gedefinieerd als A'. Deze waarde staat afgebeeld in Figuur 4.21.

Voor de nieuwe waarde van B, nl. B', simuleren we de situatie waarbij de spiegel schakelt op het eind van dezelfde halve periode terwijl de tegenfase-zaagtandfunctie V_{T2} de waarde D bereikt. We kiezen de waarden V_{DC1} en V_{DC2} nu respectievelijk gelijk aan 12.5V en 17.5V. Voor V_{T2} stellen we als spanningswaarde D in. We simuleren de *pull-in*-spanning aan zijde 1 voor deze situatie en verkrijgen op die manier de waarde B' (zie Figuur 4.21).

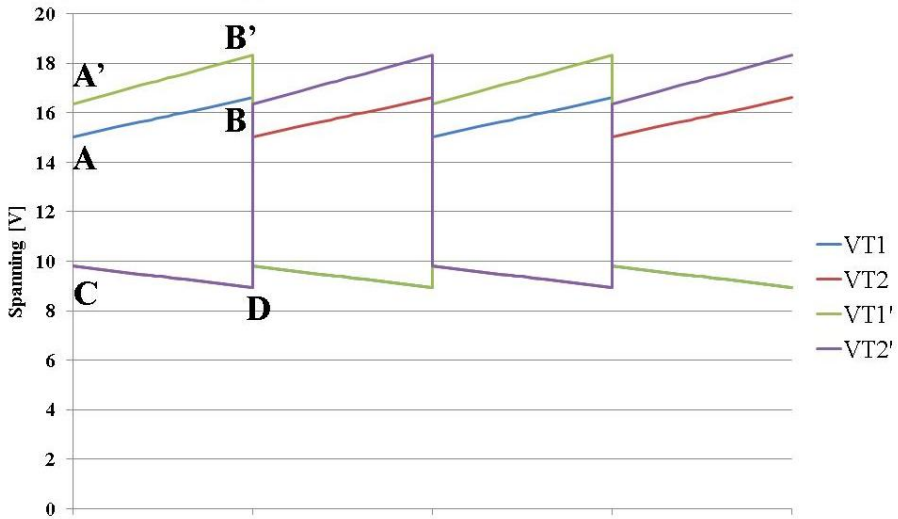


Figuur 4.21: Gesimuleerde V_{PI} en V_{PO} in functie van de elektrodespanning V_{DC} samen met de geoptimaliseerde spanningspunten B' en A'.

We stellen nu in Figuur 4.22 de vernieuwde zaagtandgolfformen V'_{T1} en V'_{T2} voor, waarbij de vroegere eindpunten B en A voor de *pull-in*-hellingen vervangen worden door de gesimuleerde waarden B' en A'. Hierbij houden we rekening met de mutuele invloed van de tegenelektrodes bij de *pull-in*-situatie. Merk op dat geen rekening werd gehouden met de invloed van de tegenelektrodes op *pull-out*. Dit was noodzakelijk voor het bekomen van deze nieuwe waarden B' en A'.

4.3.5 Pulsbreedtemodulatie

In deze subsectie gaan we na hoe het spiegelmodel reageert op de aanstuurgolfformen uit Figuur 4.22. Daartoe spitsen we ons toe op een halve periode met de stijgende flank van V'_{T1} voor *pull-in* aan zijde 1 en de dalende flank van V'_{T2} voor *pull-out* aan zijde 2. In totaal zijn er 11 stappen of oplossingen die worden gesimuleerd. Vóór stap 1 is er een initiatiestap



Figuur 4.22: Zaagtandspanningen $V_{T1'}$ en $V_{T2'}$ van het geoptimaliseerd aanstuurschema 2, samen met V_{T1} en V_{T2} van het aanstuurschema 1.

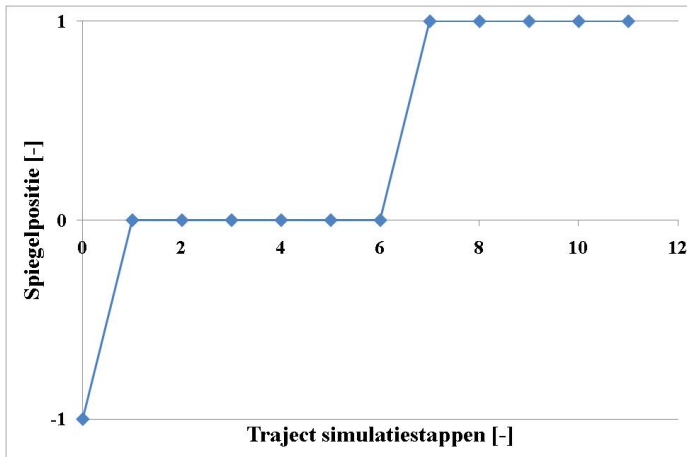
stap	V'_{T1} [V]	V'_{T2} [V]
0	0	30
1	16.37	9.80
2	16.56	9.72
3	16.76	9.63
4	16.95	9.55
5	17.15	9.46
6	17.34	9.38
7	17.54	9.29
8	17.73	9.20
9	17.93	9.12
10	18.13	9.03
11	18.32	8.95

Tabel 4.1: De spanningswaarden voor V'_{T1} en V'_{T2} voor de 11 simulatiestappen overeenkomstig een halve 'PIPO'-periode.

waarbij de spiegel in de ingeklapte toestand aan zijde 2 wordt gedwongen (V'_{T2} [V] = 30V). Tabel 4.1 toont voor deze 11 stappen de overeenkomstige spanningswaarden voor V'_{T1} en V'_{T2} . Voor stap 1 komen deze waarden overeen met respectievelijk A' en C en voor stap 11 respectievelijk met B' en D.

Als we dit traject vervolgens voor verschillende $[V_{DC1}, V_{DC2}]$ -koppels simuleren, komen we meer te weten over de 'PIPO'-werking. Voor het $[V_{DC1}, V_{DC2}]$ -koppel [15V, 15V] vinden we dat bij stap 1 de spiegel niet in

de ingeklapte toestand blijft (zie Figuur 4.23). Bij stap 7 is de spiegel evenwel ingeklapt aan zijde 1. Daarvoor verkeert de spiegel in een intermediaire positie. Dit is uiteraard geen gewenst 'PIPO'-schakelen. Preferentieel schakelt de spiegel van de ingeklapte toestand aan zijde 2 in één ruk naar zijde 1.



Figuur 4.23: Voorstelling van het gesimuleerd spiegeltraject voor het $[V_{DC1}, V_{DC2}]$ -koppel $[15, 15]$.
 (-1: ingeklapt aan zijde 2, 0: intermediair en 1: ingeklapt aan zijde 1)

We verwachten dat door V_{DC2} te laten toenemen, het *pull-out*-moment later optreedt en dus in ons geval binnen het gesimuleerde traject. Tegelijkertijd zal dit een invloed hebben op het *pull-in*-moment en die enigszins 'verlaten'. Door nu ook de spanning V_{DC1} te vergroten, treedt *pull-in* vroeger op, wat gepaard gaat met een geringe vervroeging van het *pull-out*-moment. Door V_{DC1} en V_{DC2} te laten stijgen verwachten we dat *pull-out* en *pull-in* elkaar tegenkomen op een bepaald punt. Dit is de kern van de werking van de *Pull-In Pull-Out*-spiegel, vandaar de benaming.

In Tabel 4.2 staan voor verschillende $[V_{DC1}, V_{DC2}]$ -koppels de gesimuleerde overgangen opgelijst. Hierbij staat 'x-y' voor een overgang waarbij *pull-out* opgetreden is bij stap x en *pull-in* is opgetreden bij de gesimuleerde stap y. De overgang 'x' staat voor een overgang waar bij stap x de spiegel direct naar de andere kant is ingeklapt, dus aan zijde 1. Dit staat bijgevolg voor een gewenste 'PIPO'-overgang. Uit Tabel 4.2 kunnen we concluderen dat de simulatie het hiervoor vermelde en verwachte 'PIPO'-gedrag bevestigt.

Als het $[V_{DC1}, V_{DC2}]$ -koppel startend bij $[15V, 15V]$ voor beide waarden stijgt, treden de *pull-out* en *pull-in*-momenten inderdaad respectievelijk

V_{DC2} [V]	V_{DC1} [V]					
	15	16	17	18	19	20
15	1-7					
16		2-6				
17			4-5	4	3	
18			6	6	5	5
19				8	8	
20				10		10

Tabel 4.2: Gesimuleerde overgangen voor verschillende $[V_{DC1}, V_{DC2}]$ -koppels ('x-y': pull-out bij stap x en pull-in bij stap y, 'x': pull-out en pull-in bij stap x).

later en vroeger op. Vanaf [18V,18V] vallen *pull-out* en *pull-in* samen en is er een gewenste 'PIPO'-overgang bij stap 6. Als we de kolom met $V_{DC1} = 18V$ beschouwen, zien we dat bij stijgende V_{DC2} de 'PIPO'-overgang later optreedt. Dit demonstreert de pulsbreedtemodulatie inherent aan 'PIPO'-spiegels. Uiteraard is V_{DC2} de bepalende factor voor het tijdstip van schakelen doordat de spiegel in eerste instantie altijd dient losgelaten te worden alvorens aan de andere kant in te klappen. Voor de rij waar $V_{DC2} = 18V$ zien we dat de invloed van de DC-elektrode aan zijde 1 en dus de *pull-in*-kant eerder gering is en in kleine mate de 'PIPO'-overgang vervroegt bij toenemende V_{DC1} -spanning. Door de symmetrie van de spiegel geldt hetzelfde ook voor de daaropvolgende halve periode, waarbij zijde 2 de rol van zijde 1 overneemt en omgekeerd.

We kunnen concluderen dat om de correcte $[V_{DC1}, V_{DC2}]$ -koppels te vinden voor een desbetreffende 'PIPO'-spiegel de volgende kenmerken dienen begrepen te worden. Ten eerste bepaalt de DC-spanning aan de *pull-out*-zijde het schakelmoment. Ten tweede, bepaalt de DC-spanning aan de *pull-in*-zijde of de spiegel in één ruk kantelt van de ene zijde naar de andere. Bij toename vervroegt het schakelmoment ook maar in mindere mate ten opzichte van de andere DC-spanning. Dit alles vergt voldoende hoge DC-spanningen om een overgang te garanderen zonder intermediaire tussentoestand. Ten derde, merk op dat voor het bekomen van de $[V_{DC1}, V_{DC2}]$ -koppels verschillende vrijheidsgraden overblijven, zowel voor de DC-koppels maar ook voor de gemeenschappelijke V_{T1} en V_{T2} . Bijvoorbeeld, om het DC-spanningsbereik te beperken, kunnen de eindpunten van de stijgende en dalende flanken van de zaagtandvormen dichter bij elkaar worden gekozen op dezelfde flank. Indien bijvoorbeeld het DC-spanningsbereik kan of mag uitgebreid worden, kan ook gedacht worden aan het uitbreiden van deze flanken via extrapolatie.

4.4 Experimenteel resultaat

In deze sectie verifiëren we de gesimuleerde 'PIPO'-werking voor een gerealiseerde $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ -SiGe-'PIPO'-microspiegel. Alle metingen op 'PIPO'-spiegels werden verricht aan de lage frequentie 1kHz.

4.4.1 GEMI- en GEMII-ontwerp

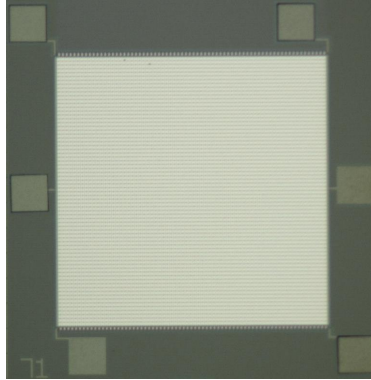
Naast '2x1'-SiGe-microspiegels werden in het Gemini-ontwerp GEMI en GEMII ook 'PIPO'-SiGe-spiegelmatrices ontworpen. In Figuur 4.24(a) zie je een microscoopfoto van een GEMI-'PIPO'-microspiegelmatrix. Rond de matrix van de $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ -PIPO'-spiegels staan zes *bondpads* voor de elektrische aansturing. Twee onderling verbonden *bondpads* dienen om de spiegels en landingelektrodes aan te sturen. De vier andere zorgen voor de elektrodespanningen V_{T1} , V_{T2} , V_{DC1} en V_{DC2} . De SEM-foto in Figuur 4.24(b) toont een bovenaanzicht van een enkele 'PIPO'-spiegel aan de rand van de matrix. De zes onderlinge elektrodes zijn zichtbaar links van de spiegel in de figuur. Door de SEM-werking is het zelfs zo dat de onderliggende elektrodes in geringe mate waargenomen kunnen worden doorheen de spiegel.

Naast de $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ -PIPO'-spiegelmatrix bevat GEMI ook een $20\mu\text{m}:4\mu\text{m}$ 'PIPO'-matrix. Door het CMP-probleem zijn bij GEMII de vier actuatie-elektrodes voor de 'PIPO'-spiegels praktisch even hoog (zie Figuur 3.4). Dit is bijgevolg nefast voor een optimale 'PIPO'-werking. Daarom behandelen we in deze sectie enkel resultaten van LDV-metingen uitgevoerd op GEMI-'PIPO'-spiegels.

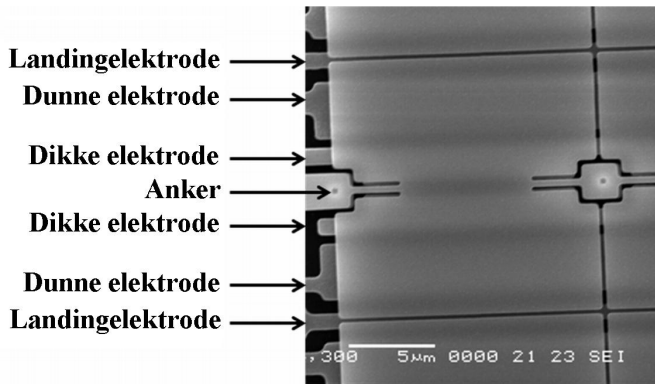
4.4.2 Variabele pull-in en pull-out

Voor een $20\mu\text{m}:4\mu\text{m}$ -PIPO'-microspiegel is de met *Comsol* gesimuleerde *pull-in*-spanning $V_{PI,COM}$ samen met de gemeten *pull-in*- en *pull-out*-spanning $V_{PI,LDV}$ en $V_{PO,LDV}$ in functie van de DC-elektrodespanning V_{DC} aan dezelfde zijde weergegeven in Figuur 4.25. Zoals we verwachten dalen zowel de simulatiewaarde $V_{PI,COM}$ als de gemeten waarden $V_{PI,LDV}$ en $V_{PO,LDV}$ bij toenemende V_{DC} . De gesimuleerde *pull-in*-spanningscurve daarentegen is groter dan experimenteel waargenomen.

De experimentele waarden $V_{PI,LDV}$ en $V_{PO,LDV}$ werden verkregen door met behulp van een eenvoudige driehoeksgolfspanning V_T de spiegel te laten inklappen en vervolgens uitklappen. We definiëren $V_{PI,LDV}$ als de spanning V_T op het moment dat de spiegel respectievelijk de helft van de verplaatsing tussen *pull-in*-startpositie en de landingelektrode afgelegd



(a) Microscopfoto van een $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMI-'PIPO'-microspiegelmatrix



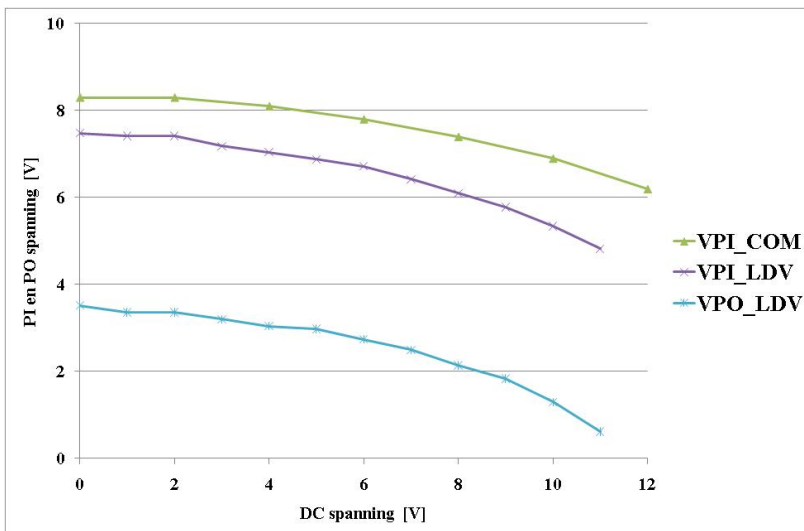
(b) SEM-foto van een $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMI-'PIPO'-microspiegel in bovenaanzicht

Figuur 4.24: Gerealiseerde $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ -'PIPO'-microspiegels.

heeft. Voor V_{PO_LDV} geldt dezelfde definitie maar dan met de helft van de verplaatsing tussen landingelektrode en *pull-out*-eindpositie.

We richten onze aandacht op de gefabriceerde $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ -’PIPO’-microspiegels in de volgende secties. In Figuur 4.26 werden analoog aan Figuur 4.25 curves voor V_{PI_COM} , V_{PI_LDV} , V_{PO_LDV} bepaald. Hiernaast werden ook de verwachte *pull-in*- en *pull-out*-spanningen volgens het simulatieprogramma *Coventor* vermeld. Deze zijn respectievelijk V_{PI_COV} en V_{PO_COV} . Terug onderscheiden we lagere gemeten *pull-in*-spanningswaarden dan verwacht via simulatie. We vinden een betere voorstelling V_{PO_COV} voor de *pull-out*-spanning.

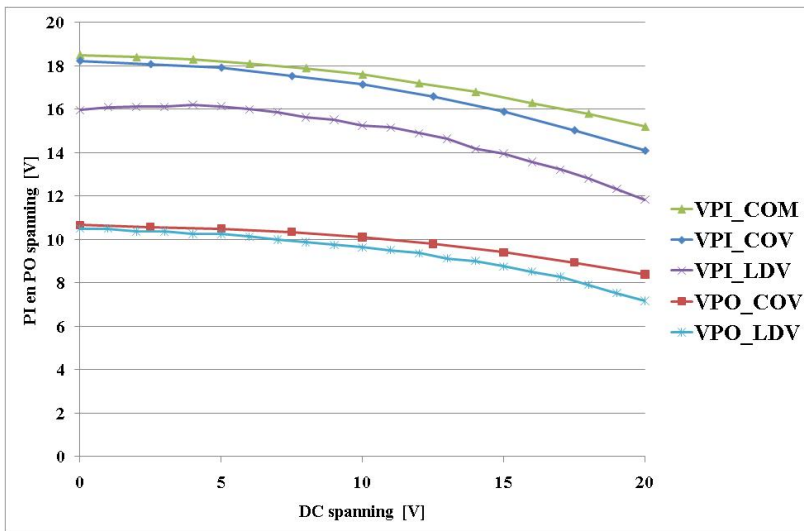
We stellen vast dat zowel voor de $20\mu\text{m}:4\mu\text{m}$ - als $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ -’PIPO’-microspiegels variabele *pull-in*- en *pull-out*-spanning bereikt wordt bij veranderende DC-elektrodespanning.



Figuur 4.25: Gesimuleerde V_{PI_COM} en gemeten V_{PI_LDV} , V_{PO_LDV} in functie van V_{DC} voor een $20\mu\text{m}:4\mu\text{m}$ GEMI-’PIPO’-microspiegel.

4.4.3 ’PIPO’-schakelen

Hieronder bespreken we de resultaten van LDV-metingen op een $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMI-microspiegel. Merk op dat deze spiegel niet dezelfde is als die waarvan de *pull-in*- en *pull-out*-spanningen in functie van V_{DC} staan afgebeeld in Figuur 4.26. De metingen hier werden namelijk op een ander *sample* gemeten op een later tijdstip. Een microscoopfoto van de bewuste spiegel staat afgebeeld in Figuur 4.27.



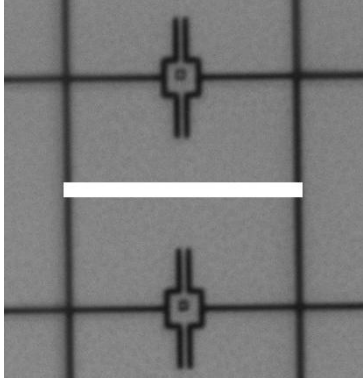
Figuur 4.26: Gesimuleerde $V_{PI,COM}$, $V_{PI,COV}$ en $V_{PO,COV}$ en gemeten $V_{PI,LDV}$, $V_{PO,LDV}$ in functie van V_{DC} voor een $15\mu\text{m}:3\mu\text{mGEMI}$ -PIPO'-microspiegel.

	Zijde 1	Zijde 2
V_{PI} bij $V_{DC} = 15\text{V}$	11.1V	12.7V
V_{PI} bij $V_{DC} = 10\text{V}$	12.9V	14.2V
V_{PO} bij $V_{DC} = 15\text{V}$	9.8V	10.4V
V_{PO} bij $V_{DC} = 10\text{V}$	9.0V	9.6V

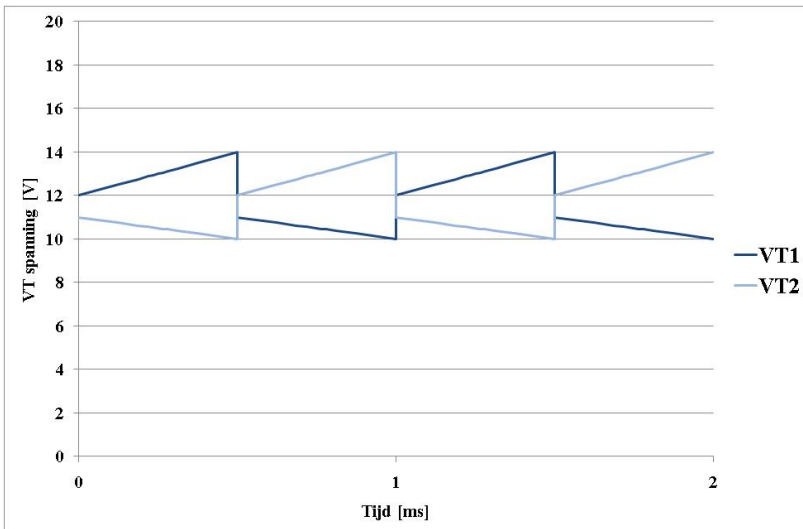
Tabel 4.3: Gemeten V_{PI} en V_{PO} voor zijde 1 en 2 van de $15\mu\text{m}:3\mu\text{mGEMI}$ -microspiegel.

Tabel 4.3 toont de gemeten V_{PI} en V_{PO} voor beide zijdes, overeenkomstig de eindpunten van het gekozen DC-spanningsbereik [10V-15V]. Het is duidelijk dat deze spanningen verschillen voor beide zijden. Op basis van metingen op verschillende spiegels kozen we de zaagtanden V_{T1} en V_{T2} met spanningspunten A = 13V, B = 14V, C = 11V en D = 10V. Deze zaagtanden staan weergegeven in Figuur 4.28. Het verschil in V_{PI} en V_{PO} voor beide zijdes zal leiden tot een andere verdeling van DC-spanningen voor beide zijdes.

Na de systematische keuze voor hogere waarden van V_{DC1} en V_{DC2} bekomen we vanaf [20V,20V] *pull-out* en *pull-in* voor de eerste halve periode. Door een verdere toename van V_{DC1} en V_{DC2} komen we geleidelijk aan dichterbij een 'PIPO'-overgang. Dit is een vlotte overgang van de spiegel van de ene ingeklapte toestand naar de andere. Voor de eerste hal-



Figuur 4.27: Geteste $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEM-microspiegel. De 4 meetpunten zijn equidistant gepositioneerd op de aangeduide witte lijn.



Figuur 4.28: Aangelegde zaagtandspanningen V_{T1} en V_{T2} .

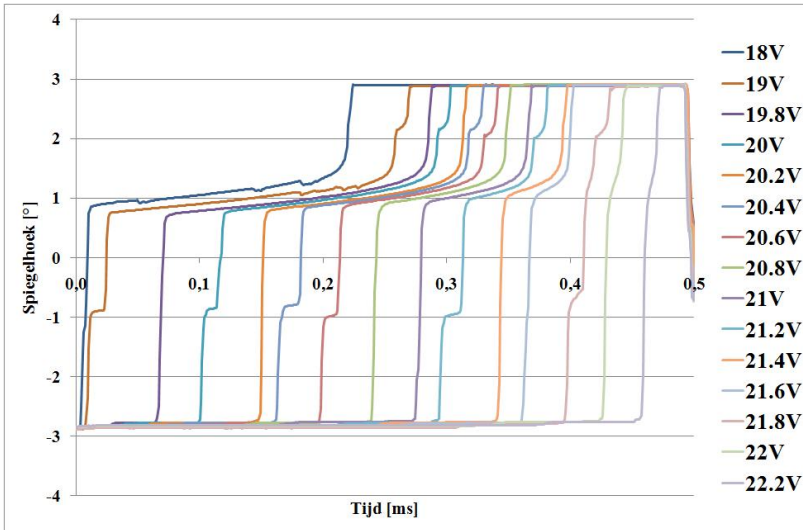
ve periode komt dit overeen met het uitklappen van de spiegel van zijde 2 naar zijde 1 waarbij de spiegel direct overgaat tot *pull-in*. De spiegelhoek α vermeld in de verdere meetresultaten is positief als de spiegel getilt is in de richting van zijde 1 en negatief in de richting van zijde 2.

Figuur 4.29 toont voor vaste $V_{DC1} = 23V$, de gemeten overgang van de spiegel voor verschillende V_{DC2} -waarden gaande van 18V tot 22.2V. De spiegelhoek werd bekomen op basis van de gemeten verplaatsing in vier equidistante meetpunten gepositioneerd op de middellijn van de spiegel (zie Figuur 4.27). Merk op dat de spiegelhoek werd getransleerd zodat minimum- en maximumwaarde symmetrisch staan ten opzichte van 0° . Op die manier vinden we een maximale spiegelhoek van 2.9° overeenkomstig de ingeklapte toestand. Merk ook op dat de metingen (identiek) werden getransleerd in de tijd zodat het gedrag van de spiegel voor de overeenkomstige eerste halve periode overeenkomt met het tijdsinterval [0ms-0.5ms]. We kozen de nuldoorgang uit Figuur 4.39 als tijdstip $t = 0.5ms$.

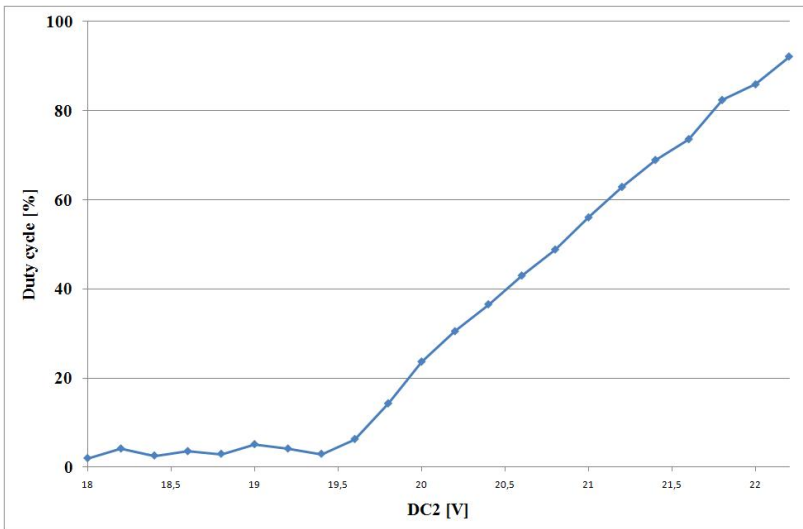
Figuur 4.29 maakt duidelijk dat voor stijgende V_{DC2} , *pull-out* steeds later optreedt. Dit is net als we verwachten uit de *Coventor*-simulaties. Na de *pull-out* roteert de spiegel naar zijde 1 en voor stijgende V_{DC2} treedt *pull-in* naar zijde 1 ook steeds later op. Het *pull-in*-moment 'verlaat' weliswaar minder sterk dan *pull-out*. Op die manier 'haalt' *pull-out* het *pull-in*-tijdstip 'in' bij toenemende V_{DC2} en verkrijgen we vanaf $V_{DC2} = 21.8V$ 'PIPO'-schakelen. Het feit dat ook *pull-in* vertraagt met groter wordende V_{DC2} betekent dat de DC-elektrode aan zijde 2 wel degelijk invloed uitoefent op de *pull-in*-spanning voor zijde 1 zoals al bleek uit simulatie.

De term *duty cycle* zullen we gebruiken om het moment van schakelen ten opzichte van elkaar te kunnen uitzetten op grafieken. We definiëren de *duty cycle* van een halve periode als de tijdsfractie waarvoor de spiegel zich aan de *pull-out*-zijde bevindt. Voor de eerste halve periode komt dit overeen met de verhouding van het tijdstip van nuldoorgang ten opzichte van de totale 0.5ms. Voor de verschillende V_{DC2} -situaties bij $V_{DC1} = 23V$ worden deze *duty cycles* weergegeven in Figuur 4.30. De *duty cycle* toont wanneer *pull-out* optreedt en dit gebeurt steeds later bij stijgende V_{DC2} . Rond $V_{DC2} = 19.5V$ verhoogt de *duty cycle*. V_{DC2} heeft dus pas vanaf deze waarde invloed op het uitklappen van de spiegel aan zijde 2. We zijn in feite enkel geïnteresseerd in het 'PIPO'-schakelen. Dit komt overeen met de vlotte overgangen met $V_{DC2} = 21.8V, 22V$ en $22.2V$. Bijgevolg kunnen we niet de volledige 100% *duty cycle* bestrijken.

Merk op dat de overgangen van Figuur 4.30 soms kleine knikjes vertonen. Dit is het gevolg van de bepaling van de spiegelhoek die is gebaseerd op metingen op vier discrete punten op de spiegel. Figuur 4.31 toont dat bijvoorbeeld voor de overgang bij [$V_{DC1} = 23V; V_{DC2} = 22.2V$] het scha-

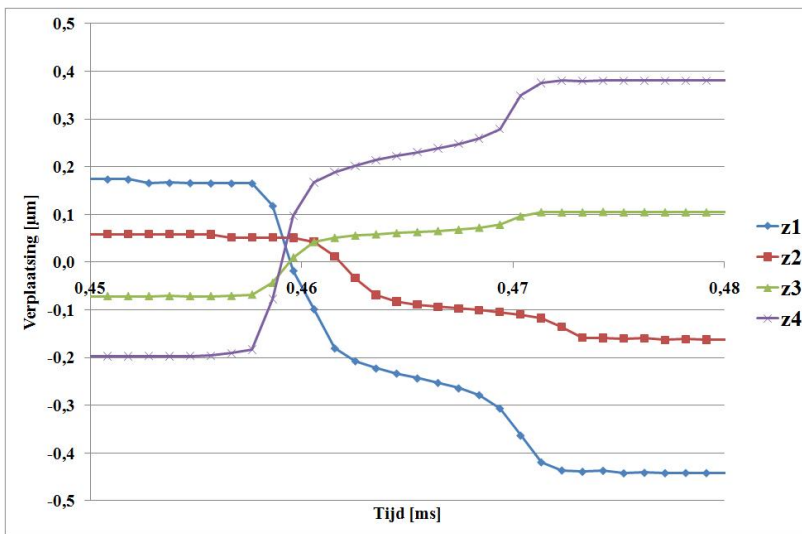


Figuur 4.29: Gemeten spiegelovergangen voor verschillende V_{DC2} met $V_{DC1} = 23V$.



Figuur 4.30: Duty cycle in functie van V_{DC2} met $V_{DC1} = 23V$.

kelen niet perfect op hetzelfde moment plaatsvindt voor de vier punten, dit terwijl het dezelfde microspegel betreft. Merk op dat de meting voor deze vier punten niet simultaan gebeurt, maar elk op een ander tijdstip. Dit betekent dat de spiegelhoek geen vlotte overgang zal vertonen bij het afwijken van de overgangen tussen de meetpunten onderling. De spreiding van 'PIPO'-overgangen werd niet verder onderzocht.

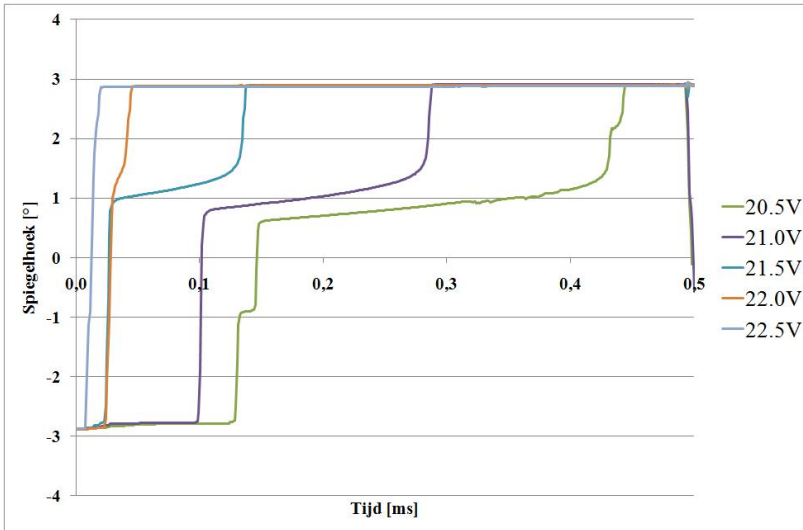


Figuur 4.31: Gemeten verplaatsing in de vier meetpunten voor $[V_{DC1} = 23V; V_{DC2} = 22.2V]$ bij de overgang van zijde 2 naar zijde 1.

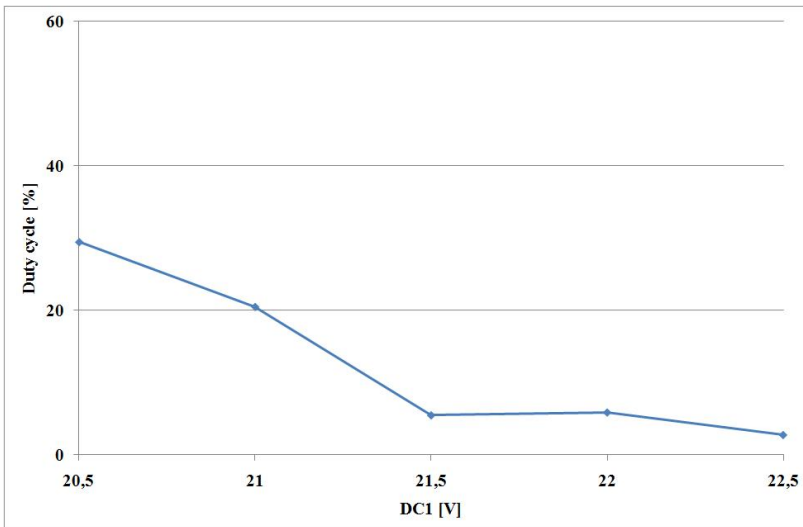
We controleren nu de invloed van de DC-spanning V_{DC1} bij vaste $V_{DC2} = 20V$. We verwachten dat bij stijgende V_{DC1} *pull-in* aan zijde 1 steeds vroeger plaats vindt. Dit is ook wat geobserveerd kan worden in Figuur 4.32. In mindere mate vervroegt het *pull-out*-moment wat de invloed als tegenelektrode voor *pull-out* illustreert. Voor de spanningswaarden $V_{DC1} = 22V$ en $22.5V$ komt dit overeen met een 'PIPO'-overgang doordat *pull-in* nu het *pull-out*-moment 'inhaalt'. De overeenkomstige *duty cycles* staan weergegeven in Figuur 4.33. Merk op dat enkel het 'PIPO'-schakelen bij $V_{DC1} = 22V$ en $22.5V$ van tel is.

4.4.4 Pulsbreedtemodulatie

Door nu V_{DC1} hoog genoeg te kiezen, garanderen we dat *pull-in* vroeg genoeg wil optreden. Als *pull-in* namelijk moet 'wachten' op *pull-out*, verkrijgen we de benodigde 'PIPO'-overgangen. Zo staan voor $V_{DC1} = 26V$ de spiegelovergangen voor verschillende V_{DC2} -waarden afgebeeld. Hierbij

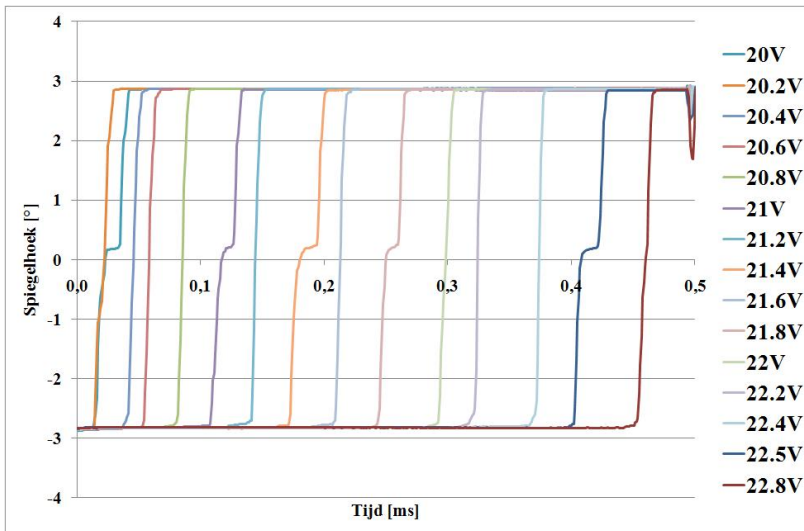


Figuur 4.32: Gemeten spiegelovergangen voor verschillende V_{DC1} met $V_{DC2} = 20V$.



Figuur 4.33: Duty cycle in functie van V_{DC1} met $V_{DC2} = 20V$.

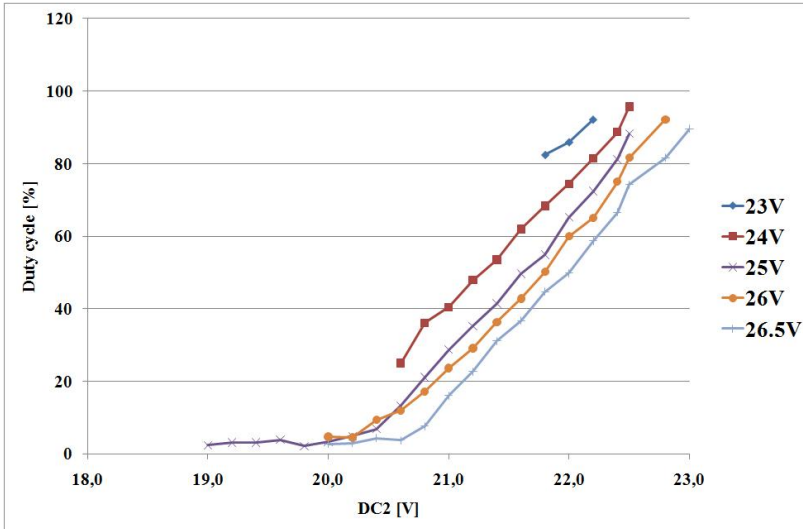
zijn alle spiegelovergangen kennelijk 'PIPO'-overgangen. De *duty cycles* die voor verschillende V_{DC2} -waarden bij $V_{DC1} = 26V$ bereikt worden, zijn weergegeven in Figuur 4.35. Ook andere *duty cycle*-curves worden getoond voor $V_{DC1} = 23V, 24V, 25V$ en $26.5V$ waarbij enkel de 'PIPO'-overgangen staan vermeld. Door V_{DC1} groot genoeg te kiezen, kunnen we het 'PIPO'-schakelen uitbreiden tot de gehele halve periode.



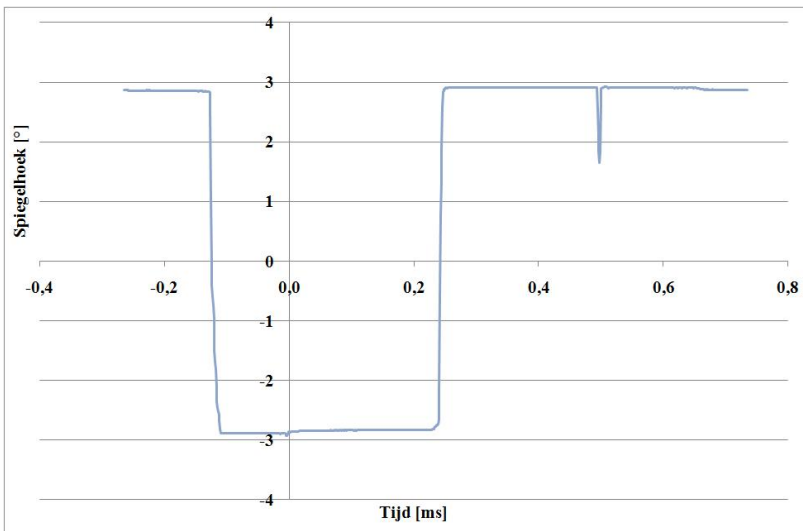
Figuur 4.34: Gemeten spiegelovergangen voor verschillende V_{DC2} met $V_{DC1} = 26V$.

Tot slot demonstreren we 'PIPO'-werking voor de volledige periode. Voor de eerste helft van de periode kiezen we [$V_{DC1} = 25.5V; V_{DC2} = 21.5V$] en voor de tweede helft [$V_{DC1} = 22.1V; V_{DC2} = 21.6V$]. We krijgen uiteindelijk een correct 'PIPO'-schakelen tussen zijde 1 en 2. Voor de eerste helft van de periode bedraagt de *duty cycle* 49.2%, voor de tweede helft is deze 24.8%. We verkrijgen dus een 'PIPO'-schakelen voor de volledige periode, waarbij een *duty cycle* van 37% wordt behaald. Dit betekent dat de spiegel 37% van de tijd aan zijde 2 staat. Door de DC-spanningen te wijzigen, kunnen we de twee schakeltijdstippen variëren. Op een elektromechanische manier verkrijgen we dus een pulsbreedtemodulatie van de spiegel.

Doordat we bij de LDV-experimenten kozen voor een ander initieel spanningsbereik dan bij de simulaties, kunnen deze resultaten niet rechtstreeks vergeleken worden. Wel worden de verwachte 'PIPO'-werkingsmechanismen experimenteel bevestigd.



Figuur 4.35: Duty cycle van 'PIPO'-overgangen in functie van V_{DC2} voor verschillende V_{DC1} .



Figuur 4.36: 'PIPO'-werking bij $[V_{DC1} = 25.5V; V_{DC2} = 21.5V]$ voor eerste halve periode en bij $[V_{DC1} = 22.1V; V_{DC2} = 21.6V]$ voor de tweede halve periode.

4.5 Kenmerken

We gaan in deze sectie enkele kenmerken van het schakelen van de $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMI-'PIPO'-microspiegel na, zoals elektrische CMOS-compatibiliteit, schakeltijd, resolutie en het dynamisch pistoneffect.

4.5.1 CMOS-compatibiliteit

Voor de overgangen bij $V_{DC1} = 25\text{V}$ in Figuur 4.35, zijn de noodzakelijke V_{DC2} -spanningen voor een volledige *duty cycle*-curve groter dan 20V. Dit betekent dat de DC-spanningen binnen het bereik [20V-25V] kunnen zorgen voor de analoge PWM. Dit demonstreert een 'PIPO'-werking die compatibel is met het standaard CMOS-spanningsbereik 5V.

Voor de situatie $V_{DC1} = 26.5\text{V}$ (zie Figuur 4.35), zijn V_{DC2} -spanningen nodig lager dan $26.5\text{V} - 5\text{V} = 21.5\text{V}$ om alle *duty cycles* te bestrijken. Echter, om dit DC-spanningsbereik te beperken, kunnen de eindpunten van de zaagtandvormen dichter bij elkaar worden gekozen (op dezelfde flank) en kan zo uiteindelijk toch CMOS-compatibiliteit bewerkstelligd worden.

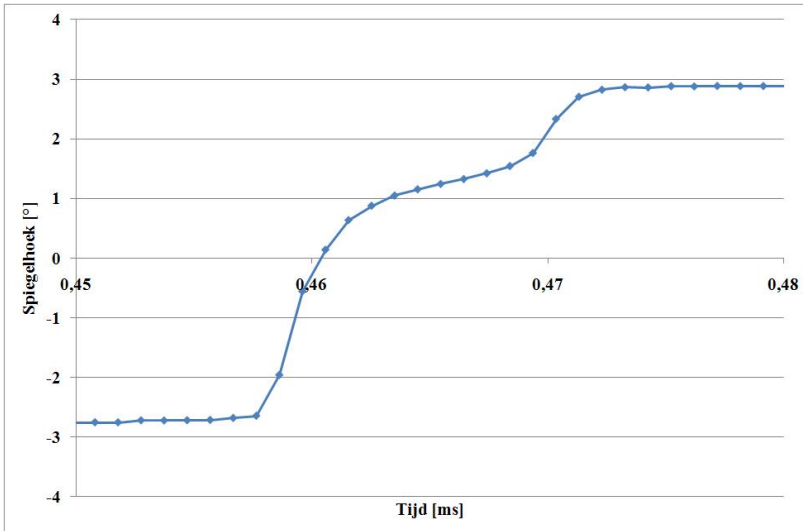
4.5.2 Schakeltijd

Voor dezelfde spanningswaarde $V_{DC2} = 22.2\text{V}$ gaan we nu na hoe de schakeltijd verschilt tussen $V_{DC1} = 23\text{V}$ en de hogere $V_{DC1} = 26.5\text{V}$. In Figuren 4.37 en 4.38 staat de 'PIPO'-overgang voor de twee situaties tijdens de eerste halve periode afgebeeld in detail. De schakeltijd voor $V_{DC1} = 23\text{V}$ bedraagt ongeveer $15\mu\text{s}$ terwijl deze voor een hogere 26V verlaagt tot $9\mu\text{s}$. Dit valt te verklaren door het groter aangelegde elektrische veld waardoor de spiegel sneller neigt in te klappen.

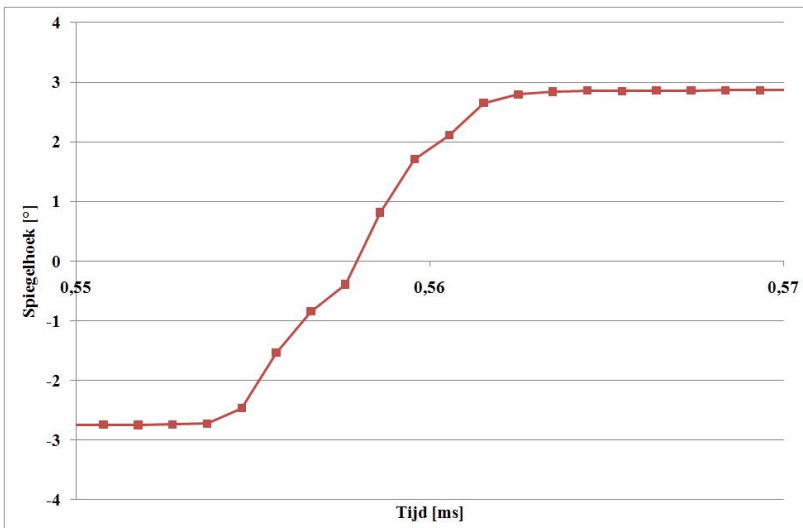
4.5.3 Resolutie

Voor $V_{DC1} = 25.5\text{V}$ vinden we bij de grootste *duty cycles* voor de eerste halve periode een maximale waarde van 96.3%. Dit komt overeen met de gemeten spiegelovergang in Figuur 4.39. De spiegel bevindt zich $18.5\mu\text{s}$ aan zijde 1. Indien we de volledige tweede periode de spiegel aan zijde 2 houden, bekomen we een *duty cycle* voor de hele 'PIPO'-periode van 98.15%. Bovendien verwachten we dat deze spiegel een minimale dubbele schakeltijd nodig heeft van $2 \times 9\mu\text{s} = 18\mu\text{s}$.

Indien we dit willen toepassen op een displaysysteem waarbij drie primaire kleuren alterneren, betekent dit dat binnen een *kleurframe* van $16.666 / 3 = 5.556\text{ms}$ een lineaire intensiteitsdistributie bekomen kan worden met

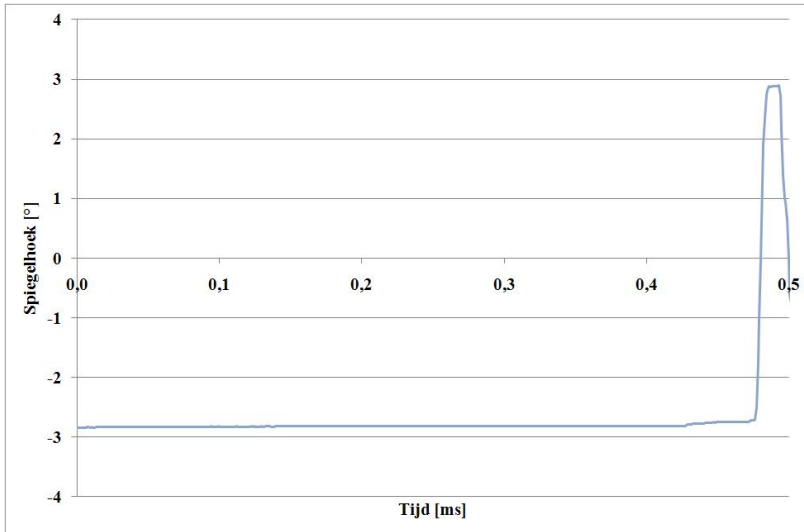


Figuur 4.37: Gemeten 'PIPO'-spiegelovergang ingezoomd op het 'PIPO'-schakelen bij $[V_{DC1} = 23V; V_{DC2} = 22.2V]$.



Figuur 4.38: Gemeten 'PIPO'-spiegelovergang ingezoomd op het 'PIPO'-schakelen bij $[V_{DC1} = 26.5V; V_{DC2} = 22.2V]$.

$5.556\text{ms} / 18.5\mu\text{s} \approx 300$ niveaus (d.w.z. een hogere resolutie dan de conventionele 8-bit-resolutie). Doordat we bij 'PIPO'-werking de schakelmomenten arbitrair kunnen kiezen, geeft dit een nog hogere potentiële resolutie.

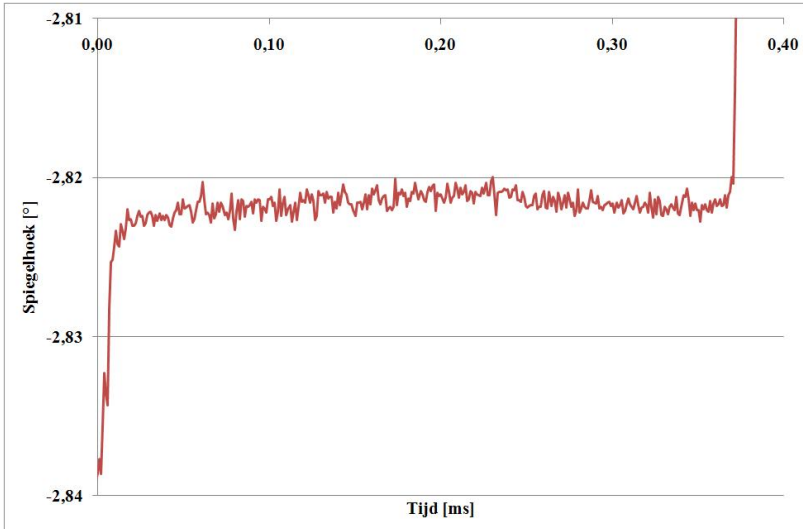
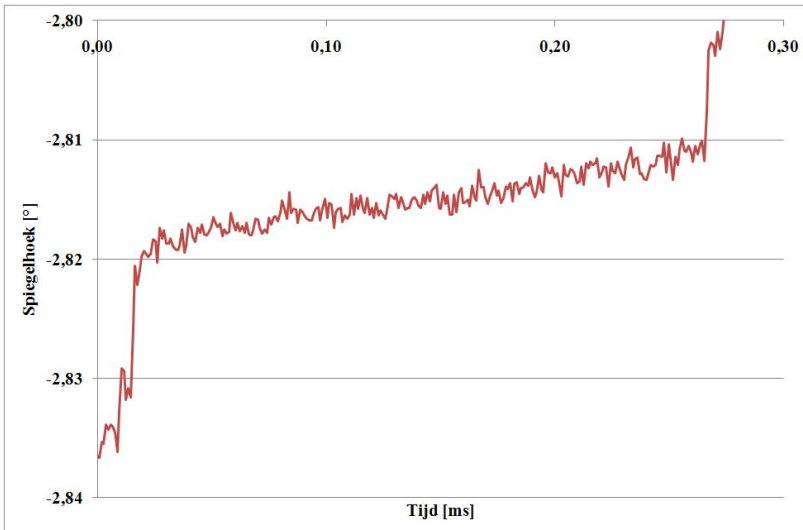


Figuur 4.39: Gemeten spiegelovergang voor $[V_{DC1} = 25.5V; V_{DC2} = 22.7V]$ gedurende de eerste halve periode.

4.5.4 Dynamisch pistoneffect

In Sectie 3.5.1 werd het pistoneffect al besproken. Dit is het fenomeen waarbij de microspiegel samen met de hengsels neerbuigt naar de elektrodes toe en zo aanleiding geeft tot een kleinere spiegelhoek.

Om te controleren of er een pistoneffect bestaat, geïnduceerd door de fluctuerende zaagtanden op de ingeklapte spiegel, staat in Figuren 4.40(a) en 4.40(b) de spiegelhoek bij ingeklapte toestand aan zijde 2 afgebeeld voor respectievelijk situaties $[V_{DC1} = 23V; V_{DC2} = 22.2V]$ en $[V_{DC1} = 26.5V; V_{DC2} = 22.2V]$. Daaruit volgt dat in de eerste situatie de spiegelhoek nagenoeg constant blijft. Bij de laatste situatie stijgt de spiegelhoek in geringe mate, waarschijnlijk door het pistoneffect. Deze afwijking van 0.03° is aanvaardbaar en verwaarloosbaar.

(a) $V_{DC1} = 23V$ (b) $V_{DC1} = 26.5V$

Figuur 4.40: Spiegelhoek tijdens ingeklapte toestand aan zijde 2 bij $V_{DC2} = 22.2V$.

4.6 Conclusie

We stelden een nieuw microspiegelmodel voor, de zogenoemde 'PIPO'-spiegel. Deze bevat vier actuatie-elektrodes waarvan twee gewijd aan hoge gemeenschappelijke spanningsvormen die geïsoleerd kunnen worden van de onderliggende CMOS-elektronica. De andere twee elektrodes worden hieruit voorzien van DC-spanningen binnen een CMOS-compatibele spanningsbereik. Op deze manier is het mogelijk via een actieve matrix de grijsniveaus te bepalen voor de spiegelpixels. Doordat we voor elke spiegel het 'PIPO'-schakelen arbitrair kunnen kiezen en zo ook de grijsniveaus, biedt dit enkele voordelen. Ten eerste kan het probleem van niet-uniformiteit tussen spiegelzijdes en spiegels onderling aangepakt worden door het gebruik van aparte opzoektabels per spiegel. Ten tweede kan de degamma-conversie en een reductie van het contoureffect (één van de belangrijkste problemen bij DLP) inherent worden uitgevoerd door een gerichte keuze van een niet-lineaire grijsverdeling. Dit is mogelijk door de analoge PWM-werking van de 'PIPO'-microspiegels.

Eerst werden simulaties uitgevoerd op een $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMI 'PIPO'-microspiegel. Dit bracht ons bij een geoptimaliseerd aanstuurschema met zaagtandvormen voor de gemeenschappelijke elektrodes. Door een vaste DC-spanning te kiezen aan de *pull-in*-zijde en een variabele DC-spanning aan de *pull-out*-zijde voor de halve periode waarvan sprake, is een afdoend *duty cycle*-bereik mogelijk. Deze resultaten werden geverifieerd voor een $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ GEMI-'PIPO'-microspiegel. 'PIPO'-werking werd vastgesteld waarbij een schakeltijd van $9\mu\text{s}$ bereikt wordt indien de DC-spanning aan *pull-in*-zijde gelijk is aan 26.5V. We bekommen een resolutie die beter is dan een lineaire 8-bit-grijsverdeling. Er werd een verwaarloosbaar dynamisch pistoneffect waargenomen als gevolg van de fluctuerende zaagtandspanningen.

Referenties

- [1] M. Kykta. *Gamma, brightness, and luminance considerations for HD displays*, 2009.
- [2] P. F. Van Kessel, L. J. Hornbeck, R. E. Meier, and M. R. Douglass. *A MEMS-Based Projection Display*. Proceedings of the IEEE, 86(8):1687–1704, 1998.
- [3] O. Bochobza-Degani, D. Elata, and Y. Nemirovsky. *Micromirror device with reversibly adjustable properties*. Photonics Technology Letters, IEEE, 15:733–735, 2003.
- [4] C. E. Tew. *Analog pulse width modulation cell for digital micromechanical device*. Patent number: US 6,466,358 B2, Date of patent: 15 October 2002.
- [5] H. De Smet and Roel Beernaert. *Method for operating a micro-mirror device with electromechanical pulse width modulation*, International application published under the Patent Cooperation Treaty (PCT), World Intellectual Property Organization. International publication number: WO 2010/122018 A1, International publication date: 28 October 2010, Priority dates: 24 April 2009 (USA), 24 September 2009 (EP).

5

Conclusie

5.1 Doelstelling

Aan de hand van zelf ontworpen en gesimuleerde SiGe-microspiegels werden in imec in het kader van het project Gemini SiGe-microspiegelmatrices ontwikkeld. De bedoeling van dit project was de ontwikkeling van een generisch technologieplatform voor het creëren van SiGe-MEMS op standaard CMOS-technologie. Het doel van mijn doctoraat was de haalbaarheid van CMOS-compatibele microspiegelmatrices aantonen, dit zowel technologisch als elektrisch. Dit laatste betekent dat de werkspanningen voorzien uit de CMOS-laag binnen een aanvaardbaar spanningsbereik (bv. standaard 5V-bereik) dienen te liggen.

5.2 Resultaten

Verschillende SiGe-microspiegelmatrices werden ontworpen en gesimuleerd. Na ontwikkeling ervan in imec werden ze gekarakteriseerd. Om een idee te krijgen over de werkspanningen gingen we voor de verschillende microspiegelmatrices op zoek naar de *pull-in*-spanning V_{PI} en *pull-out*-spanning V_{PO} . Voor verschillende basisspiegels of zogenoemde '2x1'-microspiegels werden V_{PI} en V_{PO} gesimuleerd en vervolgens gemeten (m.b.v. een LDV) op de gerealiseerde SiGe-microspiegels. De experimentele V_{PI} en V_{PO} liggen in lijn met de gesimuleerde spanningen.

Het functioneren van de microspiegelmatrices toont meteen de CMOS-compatibiliteit van de technologie aan. Vervolgens gingen we op zoek naar de elektrische CMOS-compatibiliteit van de matrices.

Het onderzoek leverde ons verschillende parameters die deze V_{PI} en V_{PO} kunnen verlagen. Ten eerste zorgen grotere microspiegels (bij gelijke spiegelhoogte) voor lagere *pull-in*- en *pull-out*-spanningen. Dit heeft echter als nadeel dat de maximale spiegelhoek en resonantiefrequentie kleiner wordt. Ten tweede geven langere en smallere hengsels een verlaging van V_{PI} en V_{PO} , alweer ten koste van een kleinere resonantiefrequentie. Ten derde geeft de implementatie van een nieuwe elektrodeconfiguratie, waarbij de elektrodes een getrapte of graduele vorm hebben, een verlaging van deze spanningswaarden. Ten vierde, de aansturing van de microspiegels via analoge hoeksturing en met het gepaste projectiesysteem vormt een alternatief [1]. Verschillende grijswaarden kunnen zo ook worden verkregen. De spiegels roteren tussen kleine spiegelhoeken zonder dat ze inklappen naar de uiterste toestanden. De werkspanningen voor deze situatie worden bijgevolg onder de *pull-in*-spanning V_{PI} gehouden. De werking van de '2x1'-spiegels werd geïllustreerd met een demo-microspiegelmatrix.

Metingen op 15 μ m-microspiegels tonen een schakeltijd (tussen de uiterste toestanden) binnen de 5 μ s, wat vergelijkbaar is met de schakeltijd van DMD-microspiegels.

De reflectiviteit van de Al-laag zoals dat van de SiGe-spiegels werd gemeten. De Al-reflectiviteit vertoont een vlakke karakteristiek net onder 80% in het zichtbare spectrum. Dit is 8% lager in vergelijking met de reflectiviteit van DMD-spiegels (88% [2]). Ook werd in samenwerking met *Sukumar Rudra (Photonics, UGent)* een geoptimaliseerde methode ontwikkeld om de optionele tijdelijke verpakking te verwijderen. De *decaptijd* werd gereduceerd tot 40s.

De door ons ontworpen werden overigens ook door anderen gebruikt voor hun onderzoek (bv. *Fangzhou Ling* [3]).

Tijdens het onderzoek naar de eenvoudige '2x1'-microspiegels doken enkele ongewenste aspecten op:

- Zo zijn de V_{PI} - en V_{PO} -waarden voor de spiegels niet uniform over de hele matrix.
- Er is ook het fenomeen stictie dat zorgt voor een grotere spreiding op V_{PO} . Dit effect kan echter verminderd worden door het voorzien van een SAM (*Self Assembled Monolayer*)-laag (werk van *Fangzhou Ling* [3]).
- Overspraak tussen aanliggende microspiegels treedt op en wordt waarschijnlijk veroorzaakt door luchtverplaatsing. Het voorzien van

een verpakking met daarbinnen een ijlere omgeving zou hiertoe een oplossing kunnen bieden. Tegelijkertijd wordt de chip zo afgeschermd van negatieve invloed van buitenaf zoals watercondens, luchtverplaatsing, stof, enz.

- Bij de meetresultaten werd telkens een lagere maximale spiegelhoek geobserveerd. Naast technologische afwijking van het ontwerp is het zogenoemde pistoneffect een boosdoener. Dit doorbuigen van de hengsels naar de elektrodes toe kan gedeeltelijk tegengegaan worden door smallere hengsels te implementeren, wat gepaard gaat met lagere werkspanningen.

Echter, om een elektrische CMOS-compatibiliteit te bekommen, bijvoorbeeld bij werkspanningen binnen een standaard 5V-bereik, is een meer complexe microspegelstructuur noodzakelijk. Een nieuwe microspegel met zes onderliggende elektrodes, de zogenoemde 'PIPO' (*Pull-In Pull-Out*)-microspegel, biedt hiertoe soelaas. Dit idee werd ontwikkeld tijdens dit doctoraat. CMOS-compatibele werkspanningen worden afgesplitst van de hoge spanningsgolfvormen. Deze zaagtandvormen zijn gemeenschappelijk voor alle spiegels van de matrix. Een actieve matrix in de CMOS-laag levert de analoge DC-spanningen binnen het CMOS-spanningsbereik. Slechts twee transistoren per pixel volstaan, wat een sterk voordeel is, de beperkte pixeloppervlakte in acht genomen.

Door de 'PIPO'-werking wordt inherent analoge PWM geïmplementeerd. Op die manier kunnen de grijswaarden voor elk pixel arbitrair worden gekozen. Dit werkingsprincipe werd voor een $15\mu\text{m}:3\mu\text{m}$ -PIPO'-spiegel zowel bewezen door simulatie als op gefabriceerde SiGe-microspiegelmatrices. De voordelen zijn:

- Elektrische CMOS-compatibiliteit werd aangetoond voor het standaard CMOS-5V-spanningsbereik.
- Het contoureffect, een van de belangrijkste nadelen van DMD, kan worden verholpen door de analoge PWM-werking van 'PIPO'-microspiegels.
- Twee transistoren volstaan om de 'PIPO'-spiegel aan te sturen, wat een voordeel is gezien de geringe pixeloppervlakte.
- Als we per microspegel een opzoektabel voorzien waar de nodige analoge spanningen kunnen worden opgeslaan, hebben we een oplossing voor de niet-uniformiteit van de SiGe-spiegelmatrix.

- Door de mogelijkheid de grijswaarden arbitrair te kiezen, kan 'de-gammaomzetting' inherent door de 'PIPO'-spiegels worden uitgevoerd. Dit reduceert *data rates*, beeldverwerkings*hardware* en geheugen in vergelijking met de standaard digitale PWM-aansturing van DMD's [4].
- Een 'PIPO'-schakeltijd van ongeveer $9\mu\text{s}$ werd bereikt. Voor een 3-kleursequentieel projectiesysteem met gewogen binaire PWM (zoals bij DMD) betekent dit een hogere resolutie dan een 8-bit-verdeling per kleur.

De 'PIPO'-spiegels werden gecontroleerd op een variërend of dynamisch pistoneffect. Een verwaarloosbare afwijking van 0.03° werd vastgesteld.

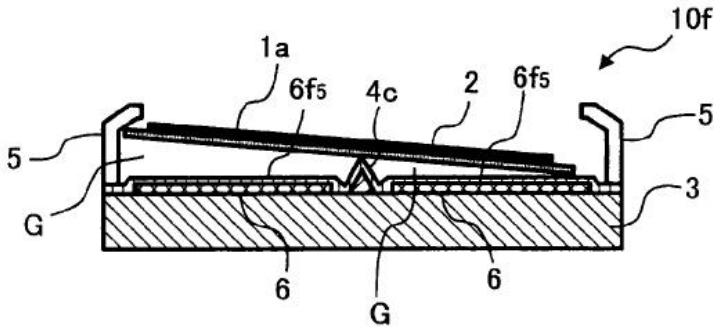
Voor deze uitvinding werd een patentaanvraag ingediend [5]. Het patent is inmiddels gepubliceerd (nog niet toegekend).

5.3 Kritische bemerkingen

- In vergelijking met de DMD-spiegels is de reflectiviteit kleiner, dit door een lagere Al-reflectie als een kleinere vulfactor. Een mogelijke oplossing zou het voorzien van een extra laag kunnen zijn, zodat de spiegel laag boven de hengsels ligt en op die manier de hengsels verstopt zijn, zoals bij het *hidden-hinge*-DMD-model.
- De maximale spiegelhoek is nog ondermaats. Voor DMD is deze hoek 10° of 12° . Zo is er het pistoneffect. Het invoeren van dunnere of kortere hengsels is één manier om dit in te perken. Een ander hengselmateriaal zou een oplossing kunnen bieden. Ook zou kunnen geopteerd worden voor een alternatieve ophanging van de spiegel, zoals in Figuur 5.1 [6].
- Er is een niet-geringe spreiding op het schakelmoment van de 'PIPO'-spiegels. Dit werd niet verder onderzocht.

5.4 Suggesties verder onderzoek

In dit doctoraatsonderzoek werd geen optische projectiesysteem gebouwd. Een eerste suggestie voor verder onderzoek is het ontwikkelen van een volledig CMOS-ontwerp met daarop een SiGe-microspiegelmatrix. Indien de



Figuur 5.1: Alternatieve 'zwevende' spiegel met ondersteuning in plaats van ophanging [6].

spiegelmatrix gecalibreerd kan worden via opzoektabelen in de elektronische laag, is optische karakterisatie van de MEMS-CMOS-chip een mogelijk volgende stap.

Mogelijke aanpassingen voor een verdere evolutie van de 'PIPO'-microspiegels zijn:

- Een grotere spiegelhoek door een hogere spiegel-elektrodeafstand g ten koste van een hogere V_{PI} .
- Een hogere reflectiviteit van de Al-laag.
- Alternatief zwevend spiegelmodel (zie vorige sectie).
- Uitbreiding van de 'PIPO'-spiegelstructuur met een extra laag om een *hidden-hinge*-versie te implementeren.
- Voor het verder verkleinen van de pixelgrootte bieden 'PIPO'-microspiegels het voordeel dat het aantal transistoren per spiegel beperkt is. Tegelijkertijd dringen minder strenge ontwerpregels voor de breedte van de elektrodes en de onderlinge afstand zich op.

Referenties

- [1] Y.S. Jo, D.-S. Yoon, S.-W. Kim, and K.-H. Hwang. *Optical performance evaluation of thin-film micromirror array in projection display*. *Optical Engineering*, 41(2):409–415, 2002.
- [2] <http://www.ti.com/>. *DLP 0.17 HVGA DDR Series 210 DMD*.
- [3] L. Fangzhou, J. De Coster, R. Beernaert, W.-Y. Lin, C. J. Pierre, and I. De Wolf. *Stiction reduction in electrostatic poly-SiGe micromirrors by applying a self-assembled monolayer film*. In 21st Micromechanics and Micro systems Europe (MME2010 Workshop), pages 44–47, Enschede, Nederland, 2010.
- [4] C. E. Tew. *Analog pulse width modulation cell for digital micromechanical device*. Patent number: US 6,466,358 B2. Date of patent: 15 October 2002.
- [5] H. De Smet and Roel Beernaert. *Method for operating a micromirror device with electromechanical pulse width modulation, International application published under the Patent Cooperation Treaty (PCT), World Intellectual Property Organization. International publication number: WO 2010/122018 A1, International publication date: 28 October 2010, Priority dates: 24 April 2009 (USA), 24 September 2009 (EP)*.
- [6] T. Nanjyo, S. Katoh, and K. Ohtaka. *Light deflection method and apparatus efficiently using a floating mirror*. Patent number: US 7,697,179 B2. Date of patent: 13 April 2010.

