

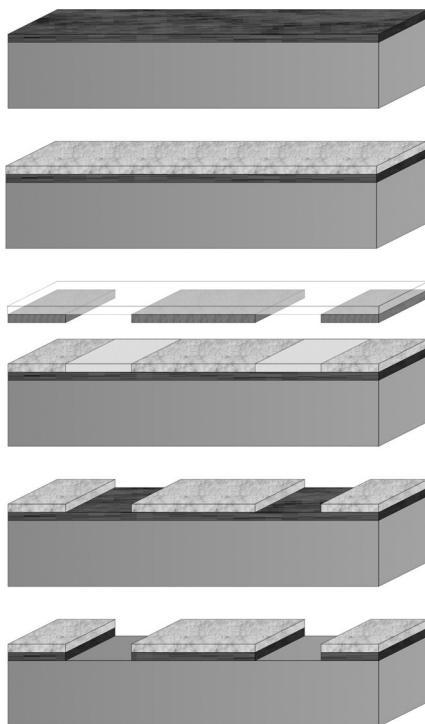
Microsysteemtechnologie verpakt in een buisje

Marcus Louwerse¹, Berry Sanders², Henry Jansen³

Microfabricage is de onderliggende techniek voor het fabriceren van microsystemen; het gereedschap voor het maken van high performance microsystemen. De technieken kunnen gebruikt worden voor het maken van druksensoren, versnellingmeters, gyroscopen, stromingsensoren, optische en RF schakelaars en bio/chemische systemen. Een ronde plak silicium of glas wordt gebruikt als basismateriaal. Deze plakken zijn een halve millimeter dik, hebben een diameter van 10 centimeter en worden wafers genoemd. De kristalstructuur van de silicium wafers is mono kristallijn en dat wil zeggen dat de atomen ordelijk gerangschikt zijn. Materiaaleigenschappen van deze wafers, als ook van aangebrachte lagen op dit substraat, spelen een cruciale rol in het succesvol fabriceren van microsystemen.

Microsysteemtechnologie

De microsysteemtechnologie (MST) maakt gebruik van de fabricagetechnieken uit de *integrated circuit* industrie, te weten film formatie, lithografie en film etsen. Door deze stappen herhaaldelijk uit te voeren worden er functionele structuren gemaakt. Figuur 1 geeft deze stappen weer. Bij film formatie wordt een laag op het substraat aangebracht of wordt er een laag gegroeid door middel van bijvoorbeeld oxidatie. Een film kan aangebracht worden, fysisch of chemisch, vanuit een gas-, vloeistof- of vaste stof fase. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen drie groepen films; geleiders, halfgeleiders en isolatoren. Na het aanbrengen van een film kan er een lithografie stap gedaan worden. Er wordt een lichtgevoelige laag (photoresist) op het substraat aangebracht waarna deze door een masker wordt belicht. Na het belichten wordt de fotogevoelige laag ontwikkeld en kan de onderliggende film geëtsd worden. Het etsen kan gedaan worden in verschillende omgevingen; vloeistoffase (nat etsen) of plasma- of gas fase (droog etsen). Nat etsen is vaak een puur chemisch proces. Het substraat met daarop de film wordt ondergedompeld in, of besproeit met, een etsvloeistof waarin de film oplost. Plasma etsen is vaak een combinatie van chemische en fysische processen. Het substraat wordt gebombardeerd met ionen waardoor



Figuur 1. Basisstappen van boven naar onder: Film aanbrengen, Photoresist aanbrengen, Belichten door een masker, Ontwikkelen van photoresist, Etsen van de film. [M. Louwerse]

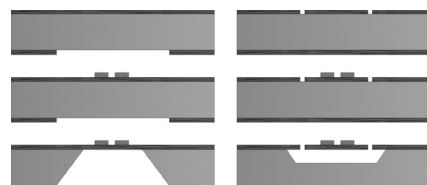
er materiaal wordt verwijderd door de overdracht van momentum.

Aan deze basisstappen zijn gespecialiseerde technieken toegevoegd die het mogelijk maken om drie dimensionale en vrij opgehangen structuren te maken. Deze gespecialiseerde fabricagetechnieken kunnen worden opgedeeld in vier hoofdcategoryën: bulk, surface, bond en mould microfabricage. Mould microfabricage is een techniek voor het maken van afdruk-

ken in verschillende materialen waarbij een gestructureerde silicium wafer als stempel dient. Deze techniek zal hier niet uitgebreid besproken worden, de andere drie technieken wel.

Bulk microfabricage

Bulk microfabricage is één van de eerste processen die in de microtechnologie werd toegepast. De techniek richt zich op het bewerken van het substraatmateriaal om zo een functionele structuur te verkrijgen. Dit wordt gedaan door delen van het substraat weg te etsen door middel van een reeks depositie, lithografie en ets stappen gevolgd door het nat- of droog etsen van het substraat. Figuur 2 laat twee processen zien voor het maken van een stromingsensor door gebruik te maken van nat etsen. De stromingsensor bestaat uit een platina weerstand op een silicium nitride membraan. De verwarmde weerstand verliest zijn warmte aan de vloeistof die erlangs stroomt waardoor de weerstandswaarde verandert. De hoeveelheid stroming wordt verkregen door de verandering in weerstand te meten. De platina weerstand is op een silicium nitride membraan geplaatst



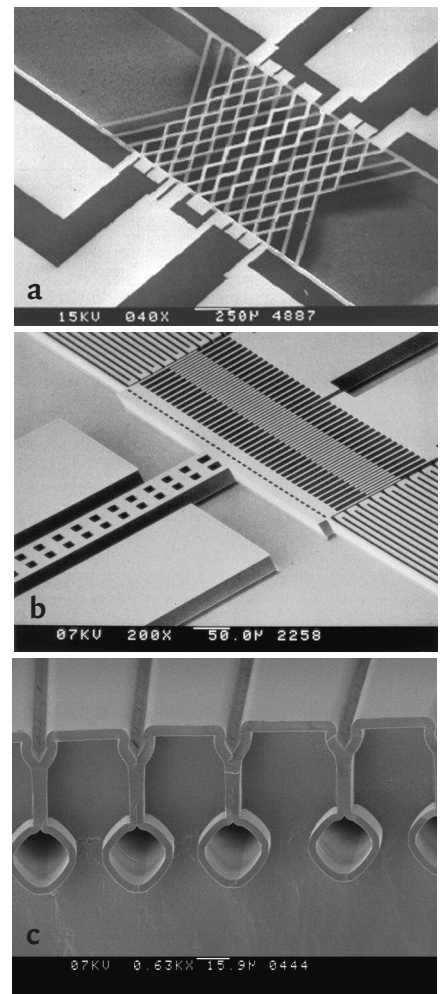
Figuur 2. Stromingsensor fabricagetechnologie. [M. Louwerse]

zodat deze thermisch is geïsoleerd van het siliciumsubstraat wat de prestatie van de sensor ten goede komt. In de eerste fabricage stap (Figuur 2 links) wordt aan beide kanten van het substraat een silicium nitride film aangebracht en aan de achterzijde gepatroneerd. Om de weerstand te maken wordt vervolgens aan de bovenzijde platina aangebracht en gepatroneerd. Uiteindelijk wordt het substraat geëtsd zodat het silicium nitride membraan over blijft. Bij dit proces wordt het substraat van twee kanten bewerkt. Dit kan een nadeel zijn omdat de maskers voor de voor- en achterzijde op elkaar uitgelijnd moeten worden en hiervoor is gecompliceerdere lithografie apparatuur nodig. Een alternatief is om van één kant bewerkingen te doen zoals Figuur 2 (rechts) laat zien. Het ontwerp van het masker voor deze methode is echter iets gecompliceerder. Figuur 4.a laat een stromingsensor zien die op deze manier gemaakt is.

Voor het etsen van het substraat wordt een etsmiddel gebruikt dat, afhankelijk van de kristal oriëntatie van silicium, in de ene richting wel etst en in de andere niet. Het etsen stopt op bepaalde kristalvlakken wat zorgt voor goed gedefinieerde gladde vlakken. Hierdoor krijgt het geëtsde siliciumsubstraat de hoekige vorm. Van deze eigenschap kan gebruik gemaakt worden maar het beperkt ook meteen de mogelijke vormen die gemaakt kunnen worden. Deze manier van nat etsen wordt *orientation dependent etching* (ODE) genoemd. Het is een goedkoop

proces en kan goed gebruikt worden voor massaproductie. Niet alleen de beperking in vorm is een nadeel van ODE. De vlakken waarop het etsen stopt zijn schuin ten opzichte van het substraattooppervlak en daardoor is het membraan op de bovenzijde van het substraat een stuk kleiner dan de maskeropening aan de onderzijde. Dit resulteert in relatief grote chips. Verder komt de uitlijning van het masker op de kristaloriëntatie van het silicium erg precies. Een voorbehandeling is nodig om de exacte kristaloriëntatie te bepalen.

Om vrijer te kunnen zijn in de vorm en om gecompliceerdere structuren te kunnen maken, zijn er plasma-ets technieken ontwikkeld. Deze techniek is over het algemeen niet afhankelijk van de kristaloriëntatie. Figuur 3 (links) laat een vrij opgehangen siliciumstructuur zien, gemaakt door een combinatie van anisotroop en isotroop etsen. Eerst worden er groeven geëtsd door middel van verticaal plasma etsen (anisotroop). Vervolgens wordt er een beschermlaag aangebracht in de groef. De beschermlaag wordt van de bodem van de groef weggeëtsd gevolgd door een tweede plasma-ets stap (isotroop). Uiteindelijk wordt een metaallaag aangebracht die dient als elektrisch contact met de vrij hangende structuur. Op deze manier kan een *comb-drive actuator* gemaakt worden (Figuur 4.b). Deze *comb-drive* bestaat uit een groot aantal vingers die elkaar elektrostatisch aan kunnen trekken. Door de groeven, die in de eerste ets



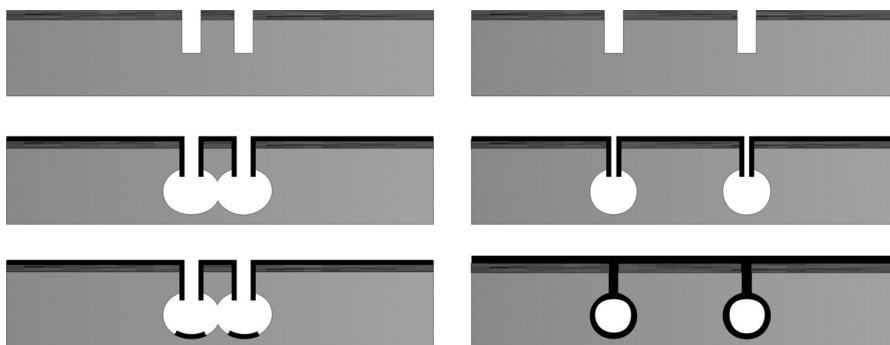
Figuur 4. Stromingsensor. [M. Louwerse]

stap worden gemaakt, minder breed te maken is het mogelijk om deze weer op te vullen zoals te zien is in Figuur 3 (rechts). Hierdoor ontstaan er kanalen onder het oppervlak (Figuur 4.c), de zogenaamde *buried channels*.

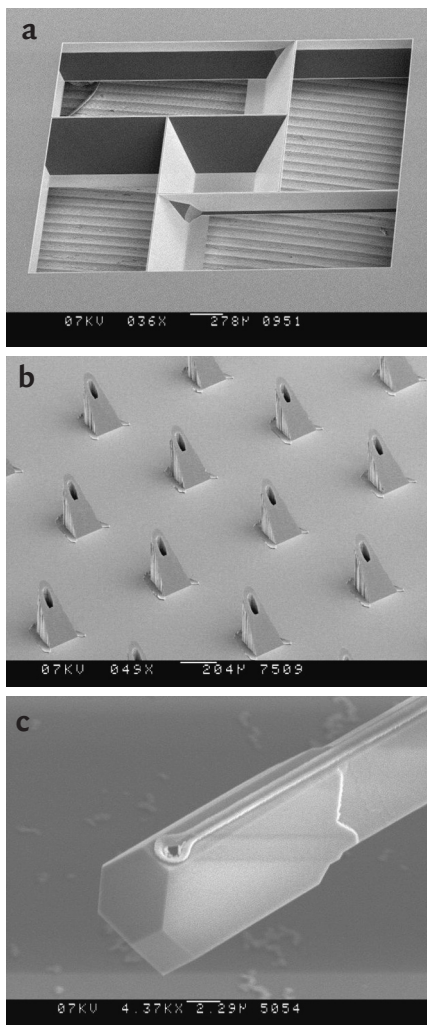
Het is mogelijk om gecompliceerdere structuren met ODE te maken door gebruik te maken van specifieke maskers of door ODE te combineren met plasma etsen. Figuur 5 laat drie van vele mogelijkheden zien: a. Silicium fan; b. Serie micro naalden die gemaakt zijn door een combinatie van ODE en plasma etsen; c. Micro pipetje voor vloeistof injectie.

Surface microfabricage

Surface microfabricage is een techniek die wordt gebruikt voor het maken van vrij opgehangen structuren op het oppervlak van een wafer. Figuur 6 laat



Figuur 3. Vrij opgehangen siliciumstructuur. [M. Louwerse]



Figuur 5. Gecomplieerde structuren die met ODE gefabriceerd kunnen worden. [M. Louwerse]

een standaard proces flow zien. Eerst wordt er een laag aangebracht op het oppervlak van het substraat die uiteindelijk weer wordt opgeofferd. Deze laag wordt dan ook een *sacrificial layer* genoemd. Deze laag wordt gepatroneerd om ankerpunten te maken. Op deze punten komt de vrij opgehangen structuur op het substraat vast te zitten. Door de dikte van de *sacrificial layer* te controleren wordt de afstand tussen de uiteindelijke structuurlaag en het substraat bepaald. Vervolgens wordt er een tweede laag aangebracht; deze laag wordt de *structural layer* genoemd. Deze laag wordt gepatroneerd met toegangsgaten tot de *sacrificial layer* zodat deze uiteindelijk weggeëtsd kan worden en er een vrij opgehangen structuur overblijft. Polykristallijn silicium (polysilicium) wordt vaak gebruikt

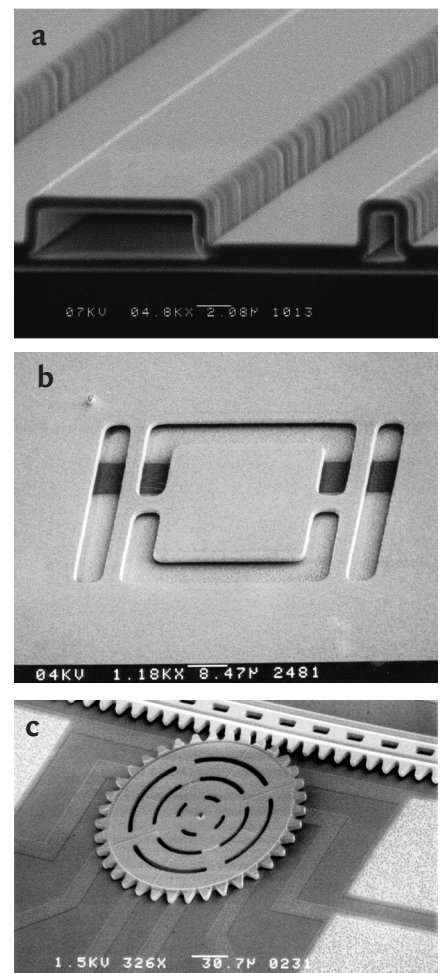
als *structural layer*, en silicium dioxide wordt vaak gebruikt als *sacrificial layer*. De laatste etsstap in het proces wordt gedaan met waterstoffluoride wat het siliciumdioxide verwijdert en het polysilicium en het silicium substraat onaangetast achterlaat.

Een welbekend probleem bij het weetsen van de *sacrificial layer* komt naar voren wanneer de *structural layer* vrij komt te hangen. Deze *structural layer* kan onder stress staan waardoor de laag kan vervormen. Om dit te voorkomen is een gecontroleerde depositietechniek nodig zodat de stress in de laag bekend is en er in het ontwerp rekening mee gehouden kan worden. Een ander probleem bij dit proces zijn beschadigingen aan de *structural layer* veroorzaakt door bubbels of door het schoonspelen van de wafers. Als laatste is er het fenomeen stictie; het blijvend vastplakken van delen van de *structural layer* aan het substraat na het drogen van de wafers. Deze problemen zijn op te lossen door de natte etsstap van de *sacrificial layer* te vervangen door een droge etsstap. Dit is mogelijk wanneer er andere materialen gebruikt worden waaronder die verwijderd kan worden met een *dry oxygen plasma*.

Figuur 7 laat drie voorbeelden zien die door middel van surface microfabricage gemaakt zijn: a. Kanalen waarvan de kleinste ongeveer $1\mu\text{m}$ breed en $3\mu\text{m}$



Figuur 6. Standaard processchema surface microfabricage. [M. Louwerse]

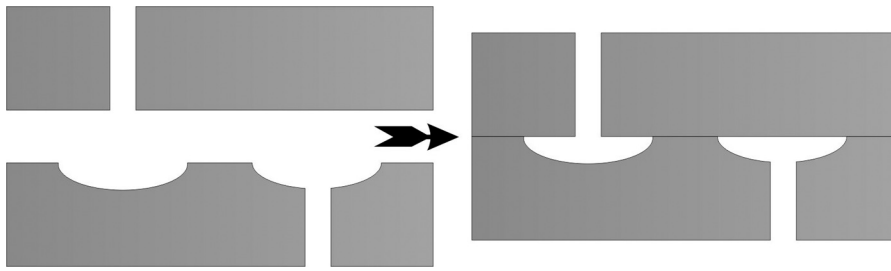


Figuur 7. Voorbeelden van surface microfabricage. [M. Louwerse]

hoog is. Deze kanalen kunnen gebruikt worden voor o.a. microcooling; b. Een spiegelkje dat gebruikt kan worden als *laser beam deflector* of voor het meten van RF vermogen door de doorbuiging van de spiegel te meten; c. Wobbel motor; het tandwiel wordt één voor één door de onderliggende elektrodes naar het substraat oppervlak getrokken waardoor het tandwiel een ronddraaiende beweging maakt. Als ware het een punaise die, met de scherpe naald op een tafel rustend, om zijn as tordeert.

Bond microfabricage

Bond microfabricage is een proces waarbij twee wafers een binding aangaan en er een structuur ontstaat aan het raakoppervlak tussen de wafers. Figuur 8 laat het standaard proces schema zien; er worden groeven geëtsd in één van de wafers en vervolgens



Figuur 8. Standaard processchema bond microfabricage. [M. Louwerse]



Figuur 9. Bond microfabricage (etsen substraat). [M. Louwerse]

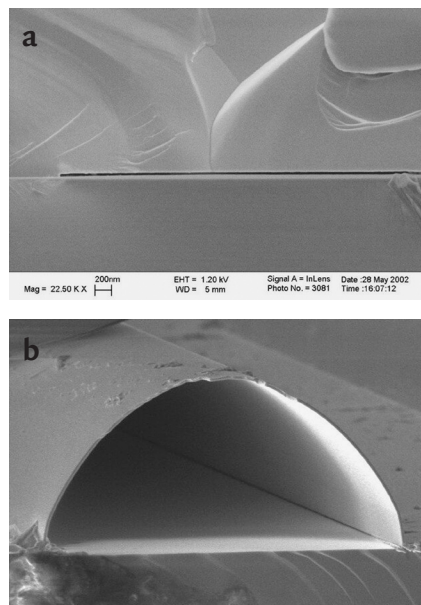
worden de wafers met elkaar verbonden.

Er zijn twee variaties mogelijk. Bij de eerste methode wordt het substraat zelf geëtsd zoals in figuur 9 te zien is. Bij de tweede methode wordt er gebruik gemaakt van een extra gepatroneerde tussenlaag waarvan de dikte goed gedefinieerd is. Toegangsgaten kunnen door de wafers heen worden geëtsd om de holtes toegankelijk te maken.

Figuur 10a laat een voorbeeld zien van de eerste methode. Eerst wordt het silicium substraat 50 nm ingeëtsd. Dan volgt er een procedure om de wafer oppervlaktes zo schoon mogelijk te maken zodat deze een goede binding met elkaar aan kunnen gaan. In de laatste stap worden de wafers aan elkaar gesmolten op een temperatuur van 1100° C gedurende twee uren. Deze hoge temperatuur stap kan vervangen worden door andere bond methodes. De geëtsde silicium wafer kan bijvoorbeeld aan een borofloat glas wafer verbonden worden op een temperatuur van 400° C. Deze temperatuur is laag genoeg om plastische deformatie van het glas, en daardoor het mogelijk sluiten van de nanokanalen, te voorkomen. Andere bond kandidaten zijn

glas op glas, twee geoxideerde silicium wafers of wafers gecoat met bijvoorbeeld een polymeer.

De mogelijkheden van bond microfabricage worden enorm uitgebreid wanneer één van de wafers, de capping wafer, wordt opgelost gedurende het proces. Figuur 9 laat zo een uitgebreid processchema zien. In de eerste stap worden er groeven geëtsd in de capping wafer en hierop wordt een capping laag aangebracht. De capping wafer wordt



Figuur 10. Voorbeelden van bond microfabricage. [M. Louwerse]

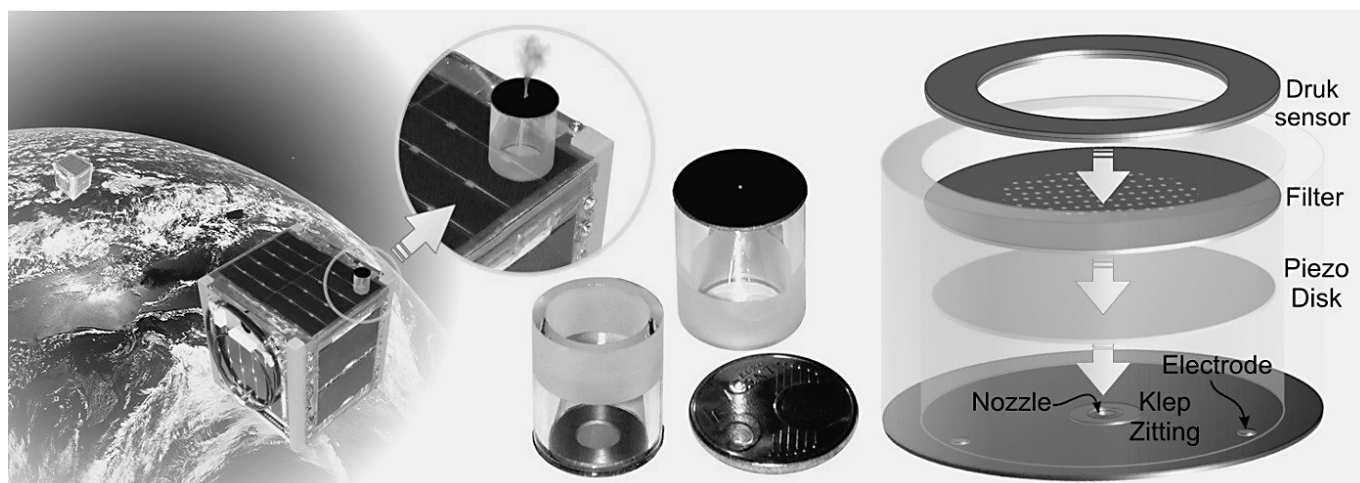
aan een andere wafer gebond en vervolgens wordt de capping wafer opgelost. Er blijft een kanaal staan met de vorm van een halve buis (Figuur 10.b). Op dit kanaal kunnen lagen aangebracht worden voor sensor (stromingsensor) of actuatie (schakelaar) doeleinden. Ook kunnen ze gebruikt worden voor het lokaal koelen van gevoelige structuren.

Packaging

Na de fabricage van een microsysteem is deze over het algemeen nog niet operationeel. Het systeem moet ingepakt worden en heeft interfaces met de buitenwereld nodig. De packaging, zoals dit genoemd wordt, van microsystemen is over het algemeen niet eenvoudig. Tot wel de helft, en soms zelfs meer, van de productiekosten voor een werkend microsysteem gaat zitten in packaging. Dit komt voornamelijk doordat de packaging voor ieder microsysteem anders is. Voor een succesvolle packaging moet rekening gehouden worden met de soms vijandige omgevingsomstandigheden waarin het microsysteem moet werken. Ook mechanische, elektrische- en vloeistof aansluitingen spelen een belangrijke rol. Vaak wordt de packaging los van het microsysteem ontwikkeld. Er is echter een andere benadering mogelijk. Door van een bepaalde packagingtechniek uit te gaan en het microsysteem daar in te passen, wordt packaging een onderdeel van microfabricage.

Microvoortstuwing

Momenteel wordt er een microvoortstuwingssysteem ontwikkeld aan de Universiteit Twente in samenwerking met TNO Defensie en Veiligheid en de Universiteit Delft, waarbij de packaging het uitgangspunt voor het ontwerp is. Dit microvoortstuwingssysteem is ontworpen voor cubesats die in formatie moeten kunnen vliegen en daarvoor enkele milliNewtons voortstuwing

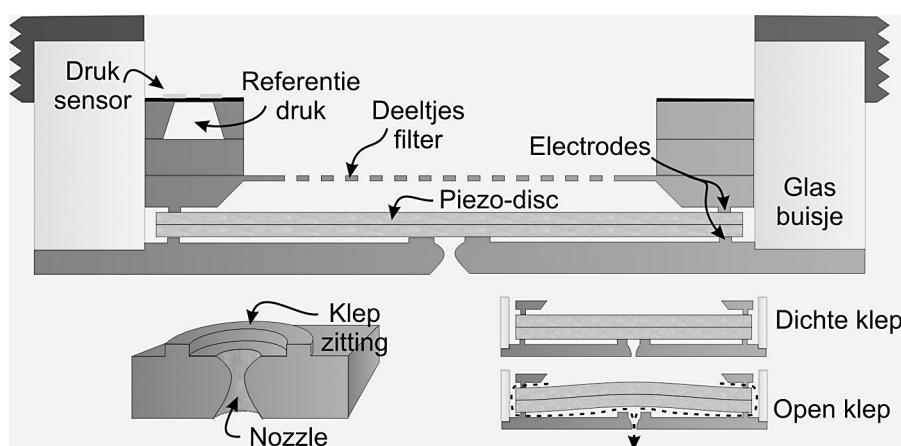


Figuur 11. Impressie van een micro voortstuwingsysteem voor cubesats. [Cubesat XI-V ESA/SSETI Team]

nodig hebben. Het is een koudgas voortstuwingsysteem en bestaat uit een deeltjesfilter, een druksensor, een klepje en een nozzle. Door het klepje te openen wordt er een kleine hoeveelheid gas onder druk door de nozzle geperst en tot supersonische snelheden versneld. In het ontwerp ligt de nadruk op de integratie van al deze onderdelen in een microsysteem. Figuren 11 en 12 laten een impressie van het microsysteem zien. Het uitgangspunt voor de packaging is een glazen buisje waarin de verschillende componenten zijn geïntegreerd. Dit glazen buisje is op een silicium wafer gesmolten (nog een toepassing van bond microfabricage) waarin zich de klepzitting en de

nozzle bevinden. De klepzitting en de nozzle zijn gemaakt door middel van directioneel plasma etsen. Het is van belang dat de klepzitting een vlak en glad oppervlak heeft zodat de klep goed kan sluiten. Op de klepzitting wordt een piezo-disc gelegd die de klep afsluit. De piezo-disc wordt ingeklemd met nog een silicium wafer. In deze wafer is een filter gemaakt zodat er geen grote deeltjes in de klep vast kunnen komen te zitten waardoor de klep gaat lekken. De piezo-disc moet net als de klepzitting, vlak en glad zijn. Door een spanning over de piezo-disc te zetten bolt de disc op en kan er gas omheen stromen zodat de klep geopend is. Als laatste wordt er een silicium ring in het

buisje gestapeld waar een druksensor in zit. Deze sensor bestaat uit een silicium nitride membraan met daarop rekstrookjes die van weerstand veranderen als ze opgerekt worden. De druk wordt verkregen door de verandering in weerstand te meten wanneer het membraan opbult door een drukverschil. Een schroefdraad aan het glasbuisje maakt het eenvoudig om het microsysteem te bevestigen aan een druktank of een ander macrosysteem. De afmetingen van dit systeem worden grotendeels bepaald door de actuator van de klep. De diameter van de piezo-disc is namelijk 12,7mm en heeft een uitwijking van 19µm onder een spanning van 360 volt. De hoge spanning die de actuator nodig heeft kan een nadeel zijn vanwege de extra elektronica die hiervoor nodig is. Uiteindelijk weegt dit microsysteem, zonder elektronica, niet meer dan 5 gram, wat voor microsattelieten zeer acceptabel is. De toepassingen voor het glasbuisje als package zijn legio. Denk bijvoorbeeld aan filtersystemen, klepjes en geïntegreerde sensoren in buissystemen. Het concept biedt een eenvoudige manier om microsystemen met de macrowereld te verbinden.



Figuur 12. Schematische werking van een micro voortstuwingsysteem voor cubesats. [M. Louwerse]

¹ Afdeling Transducer Science & Technology, Universiteit Twente (m.c.louwerse@ewi.utwente.nl)

² TNO Defensie en veiligheid

³ Afdeling Transducer Science & Technology, Universiteit Twente