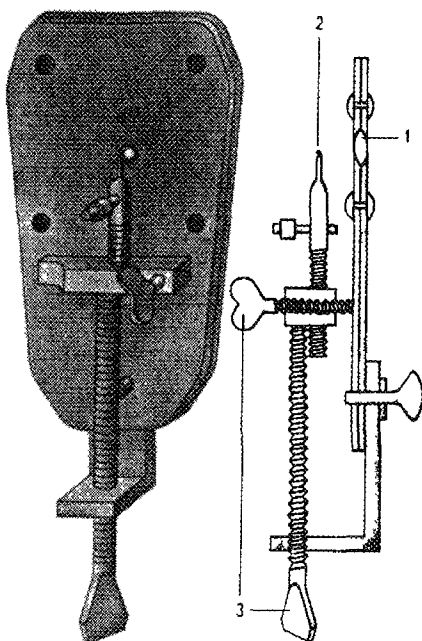


Miniatuurlensjes uit transparant teflon

Frans Zuurveen

Maakte Antonie van Leeuwenhoek de bolvormige miniatuurlensjes voor zijn beroemde microscopen (figuur 1) door druppels vloeibaar glas te laten stollen in water? Of liet hij de druppels terecht komen op een gepolijste metalen plaat? De zo ontstane halfbolvormige lensjes zou hij daarna aan elkaar gelijmd hebben, volgens een idee dat hij aantrof in een werk over microscopie van Robert Hooke. Inderdaad ja, die van de bekende elasticiteitswet, die iedere werktuigbouwer met de papelepel is ingegoten. Hoe het ook zij, driehonderd jaar later is er nog steeds een – groeiende – interesse in procédés voor de vervaardiging van miniatuurlensjes, niet alleen onmisbaar in zogenaamde geïntegreerde optica, maar ook in apparatuur voor glasvezeloptiek en voor het beschrijven en uitlezen van optische informatiedragers.



Figuur 1 Een reconstructietekening van een microscoop van Antonie van Leeuwenhoek (1632-1723) 1 bolvormig lensje, 2 preparaat, 3 stelschroeven voor de verstelling van het preparaat (Spectrum Enc)

Een veelbelovend procédé

Het procédé van de onderzoekers Stephen Mihailov en Sylvain Lazare, onlangs beschreven in *Applied Optics* [1], lijkt bijzondere perspectieven te bieden voor het maken van grote series uiterst kleine lensjes van hoge kwaliteit. Transparant amorf teflon wordt daarbij door middel van een doopstof ondoorzichtig gemaakt. Dat niet-transparante teflon wordt vervolgens door selectief wegbranden omgevormd tot kleine eilandjes. Het materiaal van deze eilandjes wordt opnieuw transparant door de doopstof weer te verwijderen. Ten slotte ontstaan er door zorgvuldige verhitting iets boven het smeltpunt – bijna – volmaakte planconvexe miniatuurlensjes. De minimale diameter van de lensjes bedraagt 50 μm , de maximale diameter 400 μm . De numerieke apertuur van de kant-en-klare lensjes ligt naar keuze tussen 0,2 en 0,3.

Transparant teflon

De merknaam teflon van Dupont is in het spraakgebruik inmiddels een soortnaam geworden voor de kunststof PTFE, oftewel polytetrafluoretheen. Het materiaal is semikristallijn en daardoor niet-transparant voor zichtbaar licht. Amorf PTFE van Dupont, met de merknaam teflon AF, is daarentegen transparant vanaf ver ultraviolet met een golflengte van 190 nm tot en met nabij infrarood met een golflengte van 2 μm .

Teflon AF is een copolymeer van PTFE en fluormethyldioxolaan en daardoor smelbaar, in tegenstelling tot zuiver PTFE, dat alleen door een sinterproces in een bepaalde vorm kan worden gebracht. Zowel de doorlaatbaarheid voor licht met een breed golflengtegebied als de makkelijke vormgeving maken deze nieuwe kunststof uitstekend geschikt voor optische toepassingen.

ArF-laser

Het proces van Mihailov en Lazare is bedoeld om van dat amorphe teflon regelmatige rijen miniatuurlensjes te vervaardigen, die voor de toepassing in la-

serprinters en faxapparaten geschikt zijn. Als individuele lensjes zijn ze bij voorbeeld bruikbaar in apparatuur voor optische communicatie. Voor de niet te verre toekomst wordt gedacht aan toepassing in geïntegreerde optica voor sensoren en actuatoren, en in nog wat verder verwijderd perspectief aan "optische computers" met fabelachtig hoge rekensnelheden.

Bij de creatie van lensjes in een bepaald patroon komen de technieken die worden gebruikt bij de fabricage van geïntegreerde schakelingen, uitstekend van pas. Het gaat er daarbij om die gedeelten van een laag die moeten worden verwijderd, selectief te belichten. Andersom worden ook wel de gebieden die moeten achterblijven, belicht. Voor dat selectief verwijderen gebruikt men dan zogenaamde negatieve of positieve lichtgevoelige lakken – ook wel "fotorezists" genoemd. Bij het etsproces eraan zorgen deze lakken er (na ontwikkeling) voor dat de gewenste gedeelten behouden blijven.

In het onderhavige proces zijn Mihailov en Lazare er echter in geslaagd het ongewenste materiaal rechtstreeks te verwijderen door smelten en verdampen. Daarvoor hebben ze gebruik gemaakt van een gaslaser met een mengsel van argon en fluor: de gaslaser type EMG 200 van de firma Lambda Physik. Deze levert UV-straling met een golflengte van 193 nm.

Van wél naar niet doorzichtig

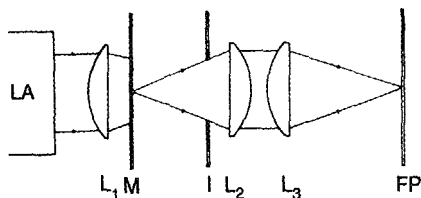
Volgens het procédé van Mihailov en Lazare moeten dus de te verwijderen gedeelten van een laag teflon AF lokaal worden verhit met behulp van bovengenoemd laserlicht. Maar helaas is teflon AF, zoals gezegd, transparant voor UV-straling met een golflengte van 193 nm. De gewenste gunstige eigenschap van het eindproduct – optische component – is in dit stadium juist ongewenst. De "truc" voor de oplossing van dit netelige probleem is het tijdelijk ondoorzichtig maken van teflon AF door het

toevoegen van een doopstof een soort triazine, met de algemene formule $C_3H_3N_3$.

Het proces voor de vervaardiging van de benodigde patronen van teflon AF begint daarom met het oplossen van deze kunststof samen met de doopstof in het oplosmiddel perfluorkoolstof. Deze vloeistof, met formule $C_{12}F_{27}N$, wordt door 3M in de handel gebracht als FC-40. De oplossing wordt door middel van centrifugeren gelijkmatig verdeeld over een substraat van kwartsglas of silicium. Na drogen blijft een laag niet-transparant teflon AF achter met een dikte van ongeveer $100\mu\text{m}$.

Selectief belichten

Figuur 2 laat het principe van de belichtingsopstelling zien. Het masker bestaat uit een substraat van kwartsglas, waarop eilandjes van wolfram zijn gesputterd. Deze eilandjes hebben de vorm van een achthoek en hun diameter bedraagt circa 1 mm. De lenzen die in de opstelling zijn gebruikt, zijn eveneens van kwartsglas.



Figuur 2 Het belichten LA ArF-laser L1 condensoren lens M masker L2, L3 afbeeldende lenzen FP laag Teflon AF op substraat

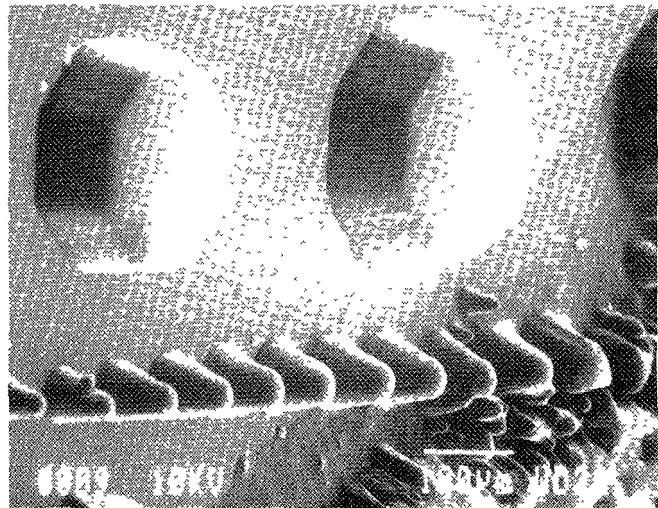
In principe wordt het maskerpatroon vijfvoudig verkleind afgebeeld op de laag teflon. Door een andere verkleining te kiezen is het echter mogelijk de afmetingen van de uiteindelijk te verkrijgen miniatuurlenzen naar behoefte te variëren.

Bij het belichten blijkt de energie van de laser voldoende om de laag teflon AF plaatselijk te smelten en vervolgens te verdampen. Daardoor blijven er op het substraat eilandjes van teflon over die een achthoekige vorm hebben, zie figuur 3.

Transparant en rond

De doopstof wordt hierna uit het teflon verwijderd door het substraat met de ei-

Figuur 3 SEM-opname van de achthoekige eilandjes van Teflon AF met doopstof. Het substraat is over een hoek van 60° gekanteld



landjes gedurende 20 minuten te verwarmen tot een temperatuur van 160°C . Dat is ongeveer de glasovergangstemperatuur van het oorspronkelijke teflon AF. Na dit "ontdopen" worden substraat en eilandjes nogmaals verhit, maar nu tot de smeltemperatuur van 300°C , eveneens gedurende 20 minuten.

Als gevolg van deze beide warmtebehandelingen krijgt het teflon AF zijn oorspronkelijke transparantie weer terug. Bovendien zorgt de oppervlaktenspanning van het vloeibare teflon ervoor dat de achthoekige vorm overgaat in een ronde. De eilandjes nemen daarom de vorm aan van fraaie miniaturbolsegmentjes, zie figuur 4. Om te onderzoeken of de transparantie en de vormnauwkeurigheid voldoende groot zijn om ze te gebruiken als miniatuurlenzen, zijn er een aantal tests gedaan

Hoe transparant?

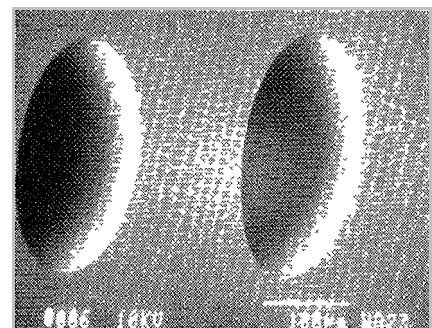
In figuur 3 is duidelijk te zien dat de eilandjes die door wegbranden van de teflonlaag ontstaan, achthoekig van vorm zijn. Na de warmtebehandeling die nodig is voor het verwijderen van de doopstof, is de contacthoek van de eilandjes gereduceerd van $82 \pm 4^\circ$ (gemeten met Alpha-Step 200 profielmeter) tot circa 60° . De materiaaldikte neemt af tot ongeveer 60% van de oorspronkelijke waarde.

De doopstof is door de warmtebehandeling niet geheel verwijderd, want wegen met een Mettler ME-30 microbalans tonen aan dat de massa is gereduceerd tot 59,8% van de oorspronke-

lijke waarde. Het totale gehalte aan doopstof was echter zodanig dat de massareductie 50% zou moeten bedragen. Desondanks laten absorptiespectra zien dat bij een golflengte van 190 nm de absorptie nog maar 40% bedraagt, tegen 22% van het ongedoopte amorf teflon. Vanaf een golflengte van ongeveer 250 nm zijn de absorptiekrommen voor het behandelde en oorspronkelijke teflon nagenoeg identiek

Hoe rond is rond?

Figuur 4 laat zien dat de achthoekige eilandjes na het laatste smeltproces zijn veranderd in kleine bolsegmenten. Er is echter een geringe variatie in de diameter van het grondvlak meetbaar: $296 \pm 14\mu\text{m}$. Deze variatie is te wijten aan een kleine tonvormige distorsie van het afbeeldende systeem in figuur 2. Daardoor is de vergroting in de uiterste hoeken van het beeld op de teflon-laag groter dan in het centrum. De hoogte van de lensjes vertoont ook enige variatie:

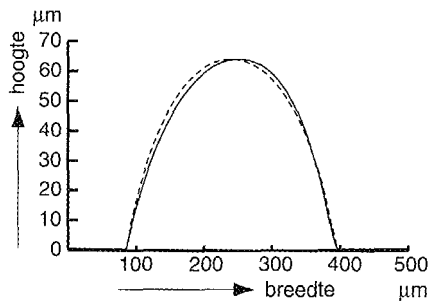


Figuur 4 SEM-opname van de half-bolvormige miniatuurlenzen die resulteren na verhitten tot de smeltemperatuur, eveneens met kanteling van het substraat over een hoek van 60°

Miniatuurlensjes uit transparant Teflon

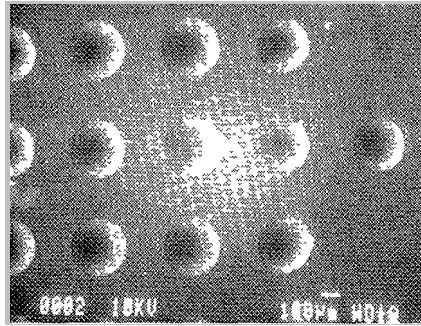
$62,9 \pm 3,3 \mu\text{m}$. Deze spreiding is een gevolg van onvolkomenheden in het centrifugeerproces voor het aanbrengen van de teflon-laag. Sommige lensjes vertonen nog geringe sporen van de oorspronkelijke achthoekige vorm na het wegbranden.

Figuur 5 toont de resultaten van metingen van de kant-en-klare lensjes met de reeds genoemde profielmeter. De theoretische kromme geldt voor dezelfde diameter van het grondvlak en dezelfde hoogte. De top is in feite zijdelings over een afstand van $16 \mu\text{m}$ verschoven. Deze afwijking is waarschijnlijk te wijten aan het niet geheel perfect horizontaal zijn van de opstelling en is daarom makkelijk te corrigeren. Er kan daarom worden geconcludeerd dat de bereikte vorm van de lensjes maar weinig afwijkt van de ideale bolvorm.



Figuur 5 Meting van het profiel van de miniatuurlensjes. De getrokken lijn is het meetresultaat, de gestippelde lijn is de theoretische curve.

Uit metingen van de reflectiecoëfficiënt, de hoogte en de radius zijn de brekingsindex, de brandpuntsafstand



Figuur 6 Een aantal miniatuurlensjes in regelmatige rijen, gemaakt volgens het procédé van Mihailov en Lazare.

en de numerteke apertuur berekend. De resultaten zijn respectievelijk: $1,47 \pm 0,09$, $480 \pm 90 \mu\text{m}$ en $0,309 \pm 0,052$. Vervolgens is laserlicht via de vervaardigde teflon-miniatuurlensjes zo lang met minimale brandvlekdiаметer op mylar-folie gefocuseerd dat het mylar smolt. Op deze manier is de brandpuntsafstand gemeten en het astigmatisme gecontroleerd. Het meetresultaat voor de brandpuntsafstand – $450 \pm 50 \mu\text{m}$ – komt goed overeen met de gemeten waarde. Vergrote SEM-opnamen van de brandvlekken op het mylar-folie laten zien dat deze weliswaar redelijk rond zijn, met een diameter van $37 \mu\text{m}$, maar ook een aantal symmetrische lijnen vertonen, die in het midden ontspringen. Deze lijnen zijn kenmerkend voor restanten van de achthoekige vorm van de eilandjes van figuur 3.

Tot besluit

De experimenten van Mihailov en Lazare hebben afdoende gedemonstreerd

dat het mogelijk is bolsegmentvormige miniatuurlenzen te maken in regelmatige rijen, zie figuur 6. Het toegepaste teflon AF is transparant voor straling met een golflengtegebied van 190 nm tot $2 \mu\text{m}$. De oppervlaktetenspanning van vloeibaar teflon zorgt voor een bijna volmaakte bolvorm. Dank zij het gebruik van een geschikte doopstof is het mogelijk gebleken de absorptie van teflon AF binnen zekere grenzen te varieren. De onderzoekers verwachten dat het proces ook uitgevoerd kan worden met polymethylmethacrylaat, oftewel perspex. Met verdere verfijning van het proces zal het ongetwijfeld mogelijk worden de geringe vormafwijkingen die zich nu nog hebben gemanifesteerd, tot vrijwel nihil terug te brengen.

Mihailov en Lazare achten het proces bruikbaar voor miniatuurlensjes vanaf $50 \mu\text{m}$ (of nog kleiner) tot en met circa $0,5 \text{ mm}$ diameter. Brandpuntsafstanden van $100 \mu\text{m}$ tot bijna 1 mm , en waarden voor de numerieke apertuur van $0,2$ tot $0,3$ zijn nu al mogelijk. Uitbreiding van deze dimensiegebieden behoort tot de perspectieven van dit veelbelovende procédé. Ongetwijfeld zal commerciële toepassing niet lang op zich laten wachten.

Literatuur

- [1] S. Mihailov en S. Lazare, Fabrication of refractive microlens arrays by excimer laser ablation of amorphous teflon, *Applied Optics* 32 (1993), p. 6211-6218