

De impact van licht met lasers

Op 22 januari jl. sprak prof.dr.ir. A.J. (Bert) Huis in 't Veld, medewerker van TNO Industrie en Techniek, zijn oratie uit als deeltijdhoogleraar Toegepaste Lasertechnologie aan de faculteit Construerende Technische Wetenschappen van de Universiteit Twente. Huis in 't Veld is per 1-1-2008 de opvolger van Johan Meijer, die begin 2007 met emeritaat ging. In zijn oratie ging Huis in 't Veld in op de toepassing van lasers voor materiaalbewerking, waaronder de productie van zonnecellen.

De eerste lasers met voldoende vermogen voor materiaalbewerking kwamen beschikbaar in de jaren tachtig. Sindsdien is er veel onderzoek verricht naar de toepassing van lasers voor bewerkingen als snijden, harden, boren, lassen en cladden. Nu focust het onderzoek zich internationaal verder op de materiaalkundige aspecten en de automatisering van deze processen. In Twente richt het onderzoek zich in de komende jaren op de automatisering van laserlassen en -cladden, en daarnaast op het relatief nieuwe gebied van de lasermicrobewerking. Hiervoor is een nieuw lasermicrolaboratorium ingericht, met naast de al beschikbare femtoseconde-laser twee nieuwe picoseconde-lasers.

Korte laserpulsen

Na een historische introductie van lasers staat Huis in 't Veld in zijn oratie stil bij misschien wel de belangrijkste ontwikkeling van de laatste jaren: het beschikbaar komen van ultrakorte laserpulsen met voldoende energie voor materiaalbewerking. Begin deze eeuw werden pulsen tot 5 femtosecondes kort gebruikt. Inmiddels wordt gewerkt met pulsen die nog een factor duizend korter zijn, in het attoseconde-bereik; 1 attoseconde is 10^{-18} seconde. Hiermee kan zelfs de beweging van elektronen worden bestudeerd.



Afbeelding 1. Bert Huis in 't Veld sprak op 22 januari jl. zijn oratie uit als deeltijdhoogleraar Toegepaste Lasertechnologie in Twente. (Foto: Universiteit Twente)

- materiaalbewerking

Wanneer een korte puls met veel energie een materiaaloppervlak treft, is de puls al afgelopen voordat er opwarming of andere thermische effecten kunnen optreden. De thermische reactie van het materiaal komt pas op gang als de puls al voorbij is. In fysisch-chemische termen betekent dit dat er niet-evenwichtsreacties optreden. En deze reacties maken veranderingen mogelijk die zich anders niet voordoen.

De toepassingen van deze ultrakorte energierijke laserpulsen liggen onder meer op het gebied van:

- micro- en nanobewerkingen,
- fotochemische spectroscopie,
- chirurgie op micro- en nanoschaal,
- opwekking van zeer hoge vermogensdichtheid,
- attoseconde-fysica.

Wat is (ultra)kort?

Een afschatting kan worden gebaseerd op de, voor een metaal, realistische aannames dat de indringdiepte van een laserpuls circa 100 nm (L_p) bedraagt en dat de snelheid waarmee thermische energie wordt verspreid (D_{therm}) $1 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ bedraagt. Dan is de tijd benodigd voor thermisch evenwicht:

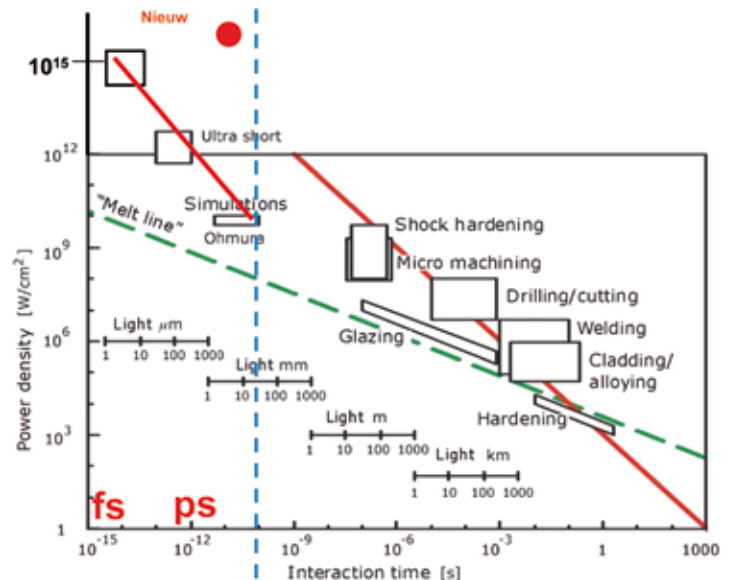
$$\tau_{therm} \approx L_p^2 / D_{therm}$$

Met $L_p = 100 \text{ nm}$ en $D_{therm} = 1 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ wordt $\tau_{therm} = 100 \text{ ps}$.

Als de pulsduur $\tau_p \ll \tau_{therm}$, veel korter is dan 100 ps, is de puls afgelopen lang voordat thermisch evenwicht wordt bereikt. De tijd die relaxatie van spanning nodig heeft is ook eenvoudig af te schatten aan de hand van de geluidssnelheid in het materiaal (v_s). Met opnieuw $L_p = 100 \text{ nm}$ en delen door $v_s = 10^3 \text{ ms}^{-1}$ is de uitkomst wederom 100 ps.

Ultrakorte pulsen zijn veel korter dan de tijd die nodig is voor het bereiken van thermisch evenwicht of relaxatie van de spanning ten gevolge van de impact van een laserpuls. Pulsen van circa 10 ps en zeker die in het femtosecondebereik zijn dus in staat om niet-evenwichtsreacties te bewerkstelligen.

Een energie van 0,125 Joule per 10 ps levert een vermogen van 12,5 GW. Als het lukt deze energie te bundelen op $400 \mu\text{m}^2$, geeft dat een vermogensdichtheid van $3 \cdot 10^{15} \text{ W/cm}^2$. Een elektrische lasboog levert, ter vergelijking, 10^4 W/cm^2 .



Afbeelding 2. Verband tussen interactietijd en vermogensdichtheid bij diverse bewerkingstechnieken.

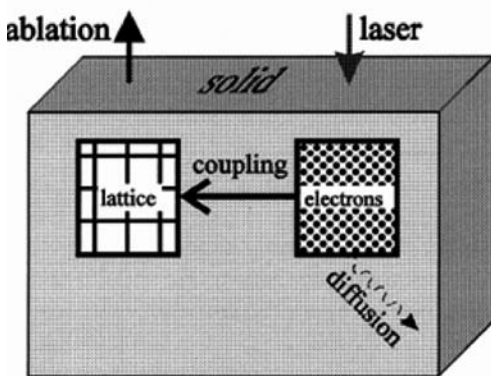
Afbeelding 2 laat zien dat hiermee een nieuw gebied wordt betreden, gekenmerkt door ultrakorte pulsen en een extreem hoge vermogensdichtheid. Met deze ultrakorte pulsen wordt de reactie bepaald door de laser-materiaalinteractie, niet door thermische materiaaleigenschappen.

Laser-materiaalinteractie

Een laserbundel gericht op atomen die in een rooster geordend zijn, brengt vooral energie over naar de elektronen die op grote afstand om de kernen bewegen; pas veel later worden ook de veel zwaardere kernen geraakt. Als het elektron zoveel energie absorbeert dat het loskomt van de kern, is er sprake van ionisatie. Hierna volgt een opsplij-

sing van het interactieproces in eenvoudige, opeenvolgende stappen (zie ook Afbeelding 3):

- absorptie van licht,
- ionisatie van materie,
- energieoverdracht van elektronen naar ionen,
- verdeling van temperatuur,
- schokgolven.



Afbeelding 3. Schematische voorstelling van de laser-materiaalinteractie.

Het laserlicht draagt zijn energie over aan de elektronen, die daardoor een veel hogere temperatuur krijgen. De thermische energie van een elektron bedraagt al snel enkele tientallen elektronVolts:

$$kT = qV$$

Met $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ en $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ komt 1 eV overeen met 11606 K. De temperatuur van elektronen kan dan ook gemakkelijk 100.000 K of hoger worden, met als gevolg explosies op microschaal en schokgolven.

Lasers werken in metaal op de vrije elektronen in de geleidingsbanden in het gebied onder de laserspot en begrensd door de indringdiepte. Omdat de elektron-fononwisselwerking een tijdschaal van tientallen tot honderd ps kent, heeft een femtoseconde-puls primair invloed op de elektronen, die een hoge temperatuur bereiken, terwijl het rooster koel blijft. De elektron- en de roostertemperatuur zijn ontkoppeld, en het metaal heeft kortstondig twee temperaturen.

Hiermee opent zich het uiterst relevante gebied van de fotofysica en -chemie van materiaalverandering ten gevolge van zeer korte laserpulsen. Dit gebied van de niet-even-

wichts-materiaalbewerkingsprocessen heeft de volgende kenmerken:

1. Ultrakorte laserpulsen creëren een hoge elektron- en trillingsexcitatie-dichtheid in de tijd zowel als in de ruimte.
2. De laserpulsduur is zo kort dat terugkeer naar een thermische en spanningsevenwichtstoestand ná aflevering van de laserenergie plaatsvindt.
3. De hoge kans op niet-lineaire laserprocessen, zoals multifotonabsorptie, geeft toegang tot toestanden die niet bereikbaar zijn via de weg van thermisch evenwicht.

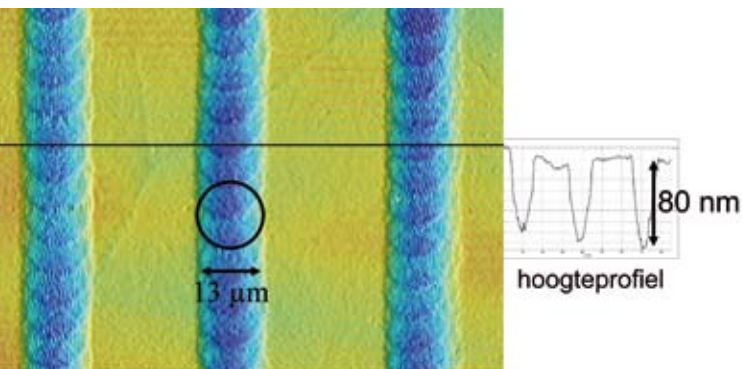
Het essentiële verschil is dat voor nanoseconde-pulsen de fluence (energie per oppervlakte) bepalend is, terwijl dat voor femtoseconde-pulsen de intensiteit (vermogen per oppervlakte) is. Dit impliceert dat de elektronexcitatie-dichtheid en de sterkte van de elektron-roosterkoppeling bepalend is voor elk ultrasnel laserproces.

Een niet-thermisch smeltmechanisme werd voorgesteld en ook algemeen geaccepteerd. Echter, ultrasnelle elektrondiffractie-opnamen laten krachtige trillingen van geïoniseerde atoomkernen zien. Dit komt overeen met temperaturen ver boven de gebruikelijke smelttemperatuur (superheating). Hierna verdwijnt de kristallijne structuur en gaat in enkele picoseconden over in een amorse toestand. De transities kunnen worden opgevat als een puur thermisch mechanisme met een initiële toestand ver boven de gebruikelijke smelttemperatuur. Dit suggereert dat in metalen ultrasnel smelten een betere aanduiding is dan de veel gebruikte term 'niet-thermisch' smelten.

Ablatie

Afbeelding 4 toont drie sporen waar ablatie is opgewekt met behulp van laserpulsen ($0,15 \text{ J/cm}^2$ en 50 mm/s en twee overscans). Ablatie is het effect dat onder invloed van een grote energietoevoer materiaal van de vaste toestand direct overgaat in de dampfase. Ablatie kent verschillende regimes: verdamping, fragmentatie, explosie en openbreken. De grootte van de laserspot bedraagt ongeveer $13 \mu\text{m}$. Nadat de sporen tweemaal zijn gescand, worden sporen gemeten van ongeveer 80 nm . Bovendien is zichtbaar dat het oppervlak na ablatie geribbeld is.

Halfgeleiders verschillen van metalen door de energie die elektronen tekort komen om geleidend te worden. Deze



Afbeelding 4. Confocale lichtmicroscopische opname van laser-ablatie-sporen op een gepolijst RVS-oppervlak. De grootte van de effectieve laserspot is ingetekend. Rechts een gemeten dwarsdoorsnede van het oppervlak.

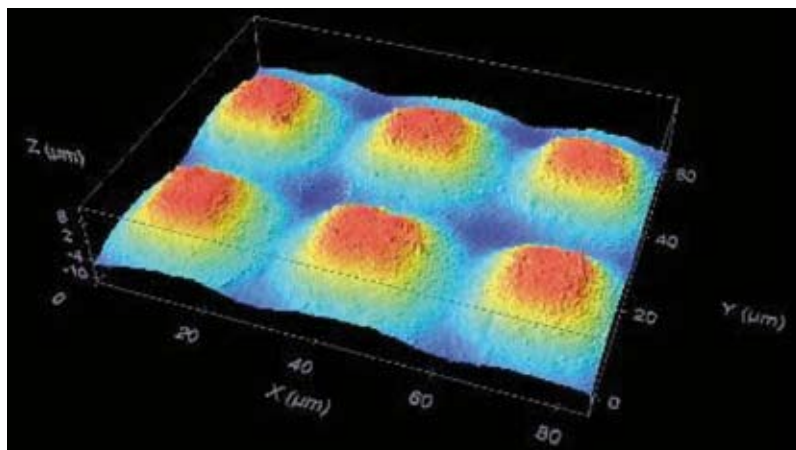
band gap kan worden overbrugd met behulp van laserenergie. Aan het oppervlak of bij defecten in het rooster is de band gap verstoord, waardoor anders dan in het perfecte bulkmateriaal extra absorptie mogelijk is. Voor materialen met een grotere band gap zijn twee of meer fotonen nodig (multi-foton excitatie) om een elektron in de geleidingsbaan te krijgen. En anders dan bij metalen zal de structuur een rol gaan spelen omdat de elektronen niet vrij zijn. Bijvoorbeeld grafiet heeft twee ablatiemechanismen. Het eerste hangt samen met de C-C bindingen in het hexagonale vlak, de tweede met de C-C binding tussen twee vlakken.

In vergelijking met halfgeleiders zorgt bij isolatoren de grotere band gap ervoor dat multi-foton effecten een essentiële rol vervullen. Verder is de polariseerbaarheid van het rooster van groter belang door de grotere Coulomb-krachten. Laserstraling genereert nieuwe energietoestanden in de band gap, waardoor de optische eigenschappen zullen veranderen. Het oppervlak van Al_2O_3 na laserbewerking is weergegeven in Afbeelding 5.

Deze multi-foton excitatie geeft de mogelijkheid voor laserbewerking de stap te zetten van micro naar nano. Hiervoor is een goede bundelkwaliteit met een Gaussische energieverdeling vereist, waardoor details kleiner dan 100 nm 'geschreven' kunnen worden. Ultra-hoge precisie lasernanomachining biedt de mogelijkheid gaatjes en lijntjes te maken met een afmeting van 10 nm; dit is van groot belang voor nanofluidics, nanochirurgie en de fabricage van micro-elektromechanische systemen (MEMS).

Ribbels

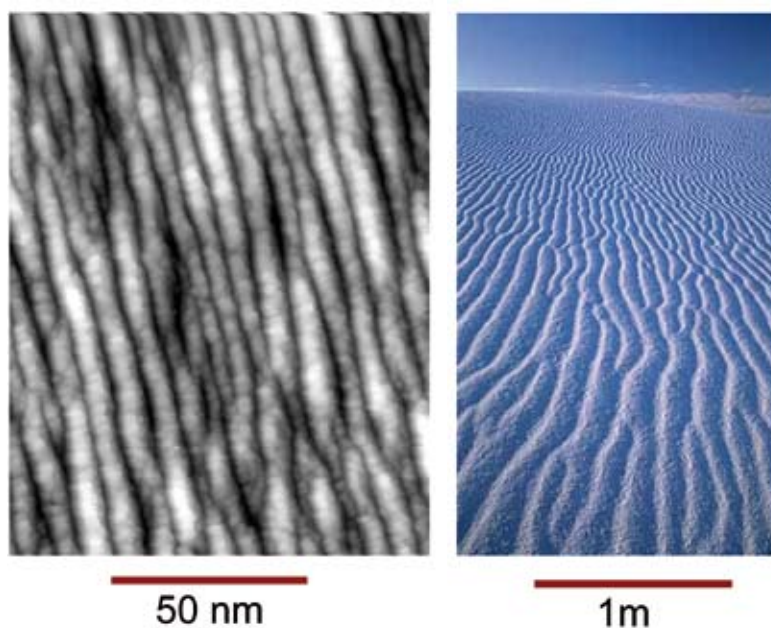
Op materiaaloppervlakken ontstaat ten gevolge van laser-ablatie een geribbelde structuur die in de macrowereld bekend is van bijvoorbeeld het zandstrand. Deze ribbels ontstaan ook ten gevolge van bestraling met ionen en worden al langer bestudeerd omdat ze interessante toepassingsmogelijkheden geven; zie ook Afbeelding 6.



Afbeelding 5. Lasertextuur op (isolator) Al_2O_3 . De confocale opname toont lasersporen die circa $18 \mu\text{m}$ breed zijn. De Al_2O_3 -deeltjes van het uitgangsmateriaal zijn $\approx 1,5 \mu\text{m}$ groot, maar na de laserbehandeling zijn ze globulair met een diameter van circa 250 nm.

Ribbels zijn al vele jaren bekend, maar er is geen sluitende theoretische verklaring voor onder meer de variatie in structuren. Ze ontstaan spontaan na bestraling van het materiaal en hebben onder meer de volgende toepassingsmogelijkheden:

- hydrofobe (lotus-effect) of hydrofiële eigenschappen,
- optische effecten (polarisatie-effecten),
- absorptie en reflectie van (elektromagnetische) straling,
- tribologische eigenschappen: wrijving, slijtage, sticking.



Afbeelding 6. Ribbels op verschillende schalen.
(a) Zilver na ionen sputteren.
(b) Zandstrand.

Zo resulteert de combinatie van nanostructuur en ablatie op microschaal in het zogeheten lotus-effect, bekend van de waterdruppels op het blad van de lotusbloem. De initiatie en groei van ribbels is het afgelopen jaar verder onderzocht, waarbij fijne ribbels met een afwijkende oriëntatie zijn ontdekt; zie ook Afbeelding 7.

Openstaande onderzoeksvragen zijn er nog voldoende:

- Hoe verloopt de laser-materiaalinteractie in de 3D ruimte, hoe is de 3D verdeling van geabsorbeerde energie en welk effect heeft dat op textuur?
- Hoe hoog zijn de temperaturen en drukken in het bereik van fs en ps?
- Hoe initiëren, groeien en transformeren zelforganiserende nanostructuren, waaronder ribbels?

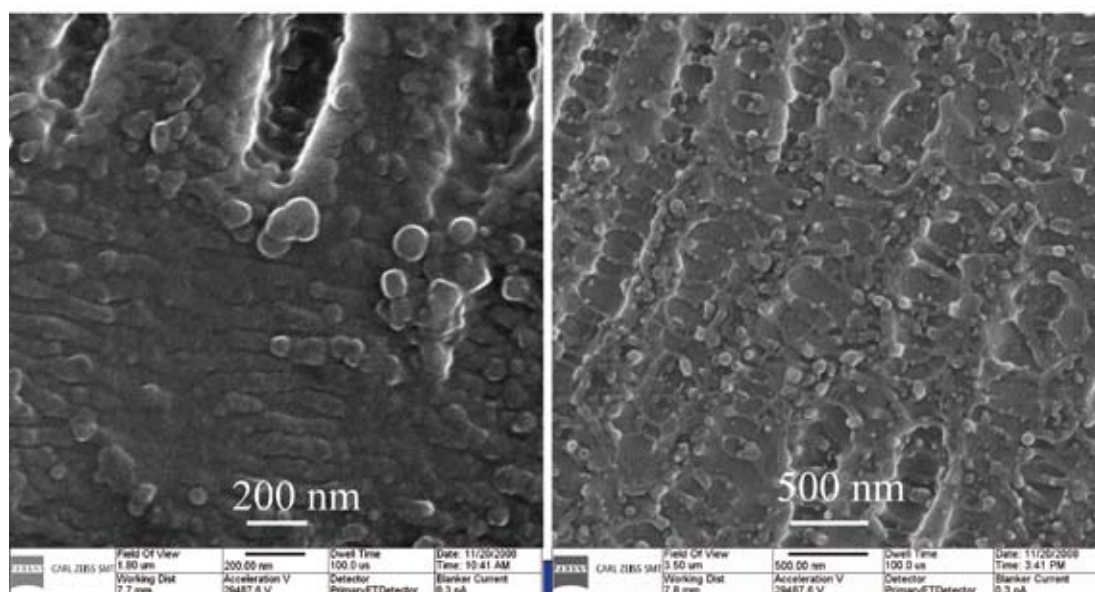
Lasers voor zonne-energie

Om zonne-energie economisch rendabel te maken, moet de efficiency van modules omhoog en moeten productiekosten van zonnepanelen fors omlaag. Laserprocessen worden op verschillende plaatsen in het productieproces steeds meer toegepast. Bij kristallijn Si-cellen worden met lasertechnologie randen geïsoleerd, om kortsluiting tussen p- en n-type Si te voorkomen. Bij dunne-film zonnecellen worden cellen gecreëerd door met een laser groefjes te maken in de

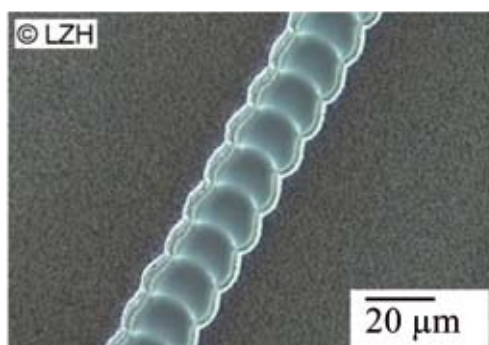
elektrodes of de actieve laag. Dit proces heet laser scribing – zie Afbeelding 8 voor een voorbeeld – en vergt naast snelheid en nauwkeurigheid ook selectiviteit en het niet optreden van redepositie.

Afbeelding 9 toont voor een dunne-film zonnecel de stroomgang. De lagen zijn enkele micrometers dik, waarbij in de middelste (actieve) laag onder invloed van licht de ladingscheiding plaatsvindt. De elektrodes voor de geleiding van de ladingsdragers zijn transparante geleidende oxides (TCO). De cel wordt gemaakt door in de lagen na depositie drie keer laser scribes aan te brengen. Om te beginnen in de onderste (rode) TCO laag, hierna wordt de actieve (bruine) laag aangebracht, en ook hierin worden scribes aangebracht. Tot slot wordt de bovenste TCO laag (grijs) aangebracht en worden scribes in de bovenste twee lagen gemaakt.

Voor sommige typen zonnecellen bevinden beide elektrodes zich aan de onderzijde, met als voordeel dat de elektrodes geen licht kunnen tegenhouden. Om de lading goed af te voeren, wordt in elke vierkante millimeter een stroomdoorvoer gemaakt. Hiervoor worden met een laser eerst gaatjes gemaakt die later worden opgevuld met een elektrisch geleidend materiaal.



Afbeelding 7. Scanning Helium Ionen Microscopie (SHIM) opnamen van grovere ribbels die initiëren in een veld van fijnere ribbels. In de dalen van de grovere ribbels is de oriëntatie van de fijnere ribbels nog aanwezig.



Afbeelding 8. Voorbeeld van een laser scribe met een breedte van $\approx 20 \mu\text{m}$.

In een oppervlak van 15 bij 15 cm^2 moeten circa 20.000 gaatjes (elk met een diameter van circa $100 \mu\text{m}$) worden gemaakt. Voor het maken van één gaatje zijn 20 pulsen van 1 mJ energie nodig. Doordat er lasers met een repetitiefrequentie van 20 kHz worden gebruikt, kunnen er 1000 gaatjes per seconde worden gemaakt.

De nieuwste lasersystemen hebben meer vermogen en een hogere repetitiefrequentie, zodat de snelheid van dit proces nog verder kan worden verhoogd. Met 50 kHz en 50 W vermogen is 2500 gaatjes per seconde in principe mogelijk. In de nabije toekomst kunnen lasers met een repetitiefrequentie van 400 kHz en meer vermogen 20.000 gaatjes per seconde binnen bereik brengen. Hier ligt een mechatronische uitdaging om het proces zowel snel als ook nauwkeurig te maken. Eén ontwikkelingsrichting bestaat uit het splitsen van de laserbundel in meerdere parallelle bundels die afzonderlijk aangestuurd kunnen worden. Deze benadering is op industriële schaal toepasbaar en biedt perspectief op snellere processen.

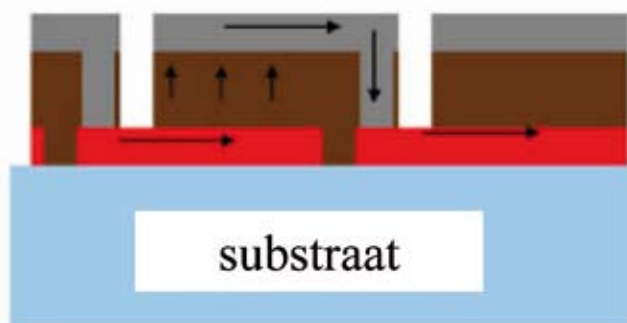
Fotonische kristallen

Op het gebied van lasertextuur is binnen Huis in 't Veld's vakgroep al veel kennis opgebouwd. Deze kan worden benut en gecombineerd met de realisatie van open structuren die licht invangen. Dit is een stap in de richting van onderzoek naar fotonische kristallen.

Fotonische kristallen die zichtbaar licht of nabij-infrarood licht absorberen, hebben structuren nodig met regelmatige afstanden van die golflengtes, dus circa 200 nm tot $1 \mu\text{m}$, en dan bij voorkeur in drie dimensies. Laser-microstructurering van materialen is een veelbelovende methode voor de vervaardiging van deze fotonische kristallen. En ultrakorte laserpulsen zijn bij uitstek geschikt vanwege sterke niet-lineaire effecten en hoge efficiency. Bovendien zijn met lasers vrijwel alle materialen te bewerken.

Uitdagingen

Tot slot zal het onderzoek zich niet uitsluitend richten op het verwijderen van materiaal, ook het met de laser deponeeren van materiaal zal worden ontwikkeld. Het in één



Afbeelding 9. Stroomgang in dunne-film zonnecel met elektrodes van transparant geleidende oxides (TCO). (grijs: TCO laag; bruin: actieve laag; rood: TCO laag)

proces maken en aanbrengen van een elektrische doorvoer is hierbij een van de doelstellingen.

Samenvattend zijn de uitdagingen voor de vakgroep op het gebied van zonne-energie onder meer:

- Toepassing van parallelle laserbundels voor hogere productiesnelheden.
- Procesontwikkeling gericht op combinatie van hoge snelheid, nauwkeurigheid en selectiviteit.
- Ontwikkeling van een lasergeactiveerd depositieproces.
- Doorontwikkeling van lasertextuur voor efficiencyverbetering.
- Vervaardiging van fotonische kristallen.

Automatisering

In het andere Twentse onderzoeksgebied, de automatisering van het laserlassen en -cladden, staan snelheid, nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de processen centraal. Voor de ontwikkeling van sensoriek en feedback-systemen is de uitgangspositie gunstig, vanwege de inbedding van de laseractiviteiten in de vakgroep Werktuigbouwkundige Automatisering. De doelstelling hier is het ontwikkelen van geavanceerde besturingssystemen om de energie- en temperatuurverdeling en de daarmee samenhangende spanningen te beheersen. Dit vereist meer aandacht voor simulatie.

Micro-nano kloof

Voor de komende jaren verwacht Huis in 't Veld nieuwe impulsen met name vanuit de microbewerkingen, zelfs richting nanobewerkingen. Afbeelding 10 toont verschillende processen die in de precisietechnologie van belang zijn. In het microgebied zijn dat onder meer draaien, frezen en slijpen, maar ook excimeer- en YAG-laserbewerking, ultrasoon bewerken en chemisch-mechanisch polijsten. In het nanogebied gaat het onder meer om lithografie, scanning tunneling microscopie en atomic layer deposition (epitaxy). Daartussen bevinden zich nog etsprocessen en bewerkingen met ionen- of elektronbundels.

Met laserprocessen kunnen beter dan met conventionele productieprocessen details kleiner dan $10 \mu\text{m}$ worden gemaakt. Door een laserbundel met een objectieflens een

factor 10 te focuseren, kunnen ook nu al details van 1 μm worden gemaakt. De komende jaren wordt het gebied tussen 1 μm en 100 nm bewerkt en de ontwikkeling om details kleiner dan 100 nm met een laserbundel direct te schrijven, is internationaal inmiddels in volle gang.

In de zogeheten micro-nano manufacturing gap, het gebied tussen 100 nm en 10 μm , kunnen volgens Huis in 't Veld met laserprocessen unieke resultaten worden bereikt omdat laserlicht op vrijwel alle materialen impact heeft en het verwijderen van materiaal bovendien veel sneller gebeurt dan bij andere processen, zoals ionenprocessen. Bovendien kunnen lasers worden toegepast onder atmosferische condities, waarbij een semi-cleanroom atmosfeer gewenst is voor constante temperatuur en ook om stofdeeltjes te vermijden. Wat betreft de kleinste hoeveelheden te verwijderen materiaal is er voor de laserprocessen geen beperkende ondergrens. Het verwijderen van afzonderlijke atomen met een lage laserenergie behoort tot de mogelijkheden.

Multidisciplinair

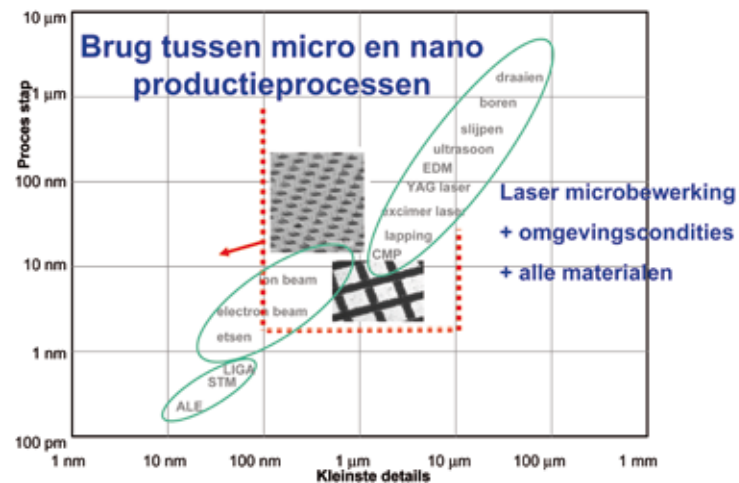
Laser-materiaalinteractie is een multidisciplinair onderwerp met verbindingen naar veel andere onderwerpen en onderzoeksgroepen. Die samenwerking wil Huis in 't Veld waar mogelijk opzoeken en stimuleren. In zijn eerste jaar als hoogleraar zijn met een aantal groepen, binnen en buiten de Twentse faculteit, kiemen voor samenwerking ontstaan. De lasertechnologie en de ontwikkeling van laserprocessen zorgt voor onderzoekslijnen naar veel andere disciplines, in het bijzonder:

- fundamentele en toegepaste fysica, waaronder optica,
- organische en anorganische chemie,
- halfgeleiderfysica en elektronica,
- biologie en medische wetenschap.

Huis in 't Veld eindigde zijn oratie met te stellen dat 3D lasermicro- en -nanobewerking en microfabricage een zeer boeiend, actief en dynamisch onderzoeksterrein is geworden. Hij verwacht dat 3D lasermicrobewerking zich zal ontwikkelen tot een van de drijvende krachten achter toekomstige nano- en microtechnologie, onder meer doordat lasermicro- en -nanobewerking van vrijwel alle materialen mogelijk is.

Grote oppervlakken

Het gemiddelde vermogen van de nieuwe picosecondelasers is 50 W en het beschikbare vermogen van deze



Afbeelding 10. Overzicht van bewerkingsprocessen in het micro- en nanobereik. Met rood is de zogeheten micro-nano manufacturing gap gemarkeerd.

systemen zal naar verwachting in de komende jaren verder toenemen. Waardoor met hogere snelheid gewerkt kan worden. Voor de productiesnelheid is de puls-repeticiefrequentie een belangrijke eigenschap. Het nieuwe systeem in de vakgroep heeft een repetitiefrequentie van 400 kHz. Dat is één puls per 2,5 μs , waarbij nog steeds de tijd tussen twee pulsen relatief erg lang is, doordat de pulsen zelf slechts 10 ps duren.

Korte laserpulsen met hoog vermogen en hoge repetitiefrequenties brengen de bewerking van grote oppervlakken dichterbij; de ontwikkeling van directe schrijftechnieken met meerdere bundels tegelijkertijd, mogelijk door interferentieverschijnselen toe te passen, zijn realistische opties. Het streven is met een laserbundel één vierkante meter oppervlak te bewerken in één uur tijd.

Referentie

Prof.dr.ir. A.J. Huis in 't Veld, 'De impact van licht', oratie Universiteit Twente, 2009.

Informatie

www.wa.ctw.utwente.nl/research/laser