

Dave Blank

De excimeerlaser

Het gebruik van excimeerlasers neemt steeds meer toe. Ook verschijnen er steeds meer artikelen over het gebruik van deze laser, zowel op het gebied van de medische technologie als op het gebied van fijnmechanische bewerkingen. Wat maakt deze laser zo uniek en wat zijn de toepassingsgebieden nu en in de nabije toekomst? Dit eerste artikel over de excimeerlaser hoopt daar een antwoord op te geven. In een volgend artikel zal meer worden ingegaan op de technische details van de toepassingen van excimeerlasers.

Inleiding

De laser neemt een steeds belangrijker plaats in in ons dagelijks leven, zo is de cd-speler bijna in elke huiskamer aanwezig. Daarnaast kunnen we niet meer zonder communicatie met behulp van lasers via satellietverbindingen en of glasvezelkabels. De streepjescode wordt in de supermarkt door een laser gelezen en de laser wordt gebruikt in de laserprinter en kopieermachine. In de techniek heeft de

laser zijn intrede gedaan bij materiaalbewerkingen zoals boren, lassen en (chemische) oppervlakte behandelingen. Bij het markeren van producten, bepalen van toleranties, zeer nauwkeurige fotolithografie en precieze afstandsbepaling worden lasers gebruikt. Het meest spectaculair is het gebruik van de laser in de medische technologie, zoals het lassen van losgelaten netvlies en het behandelen van huidaandoeningen.

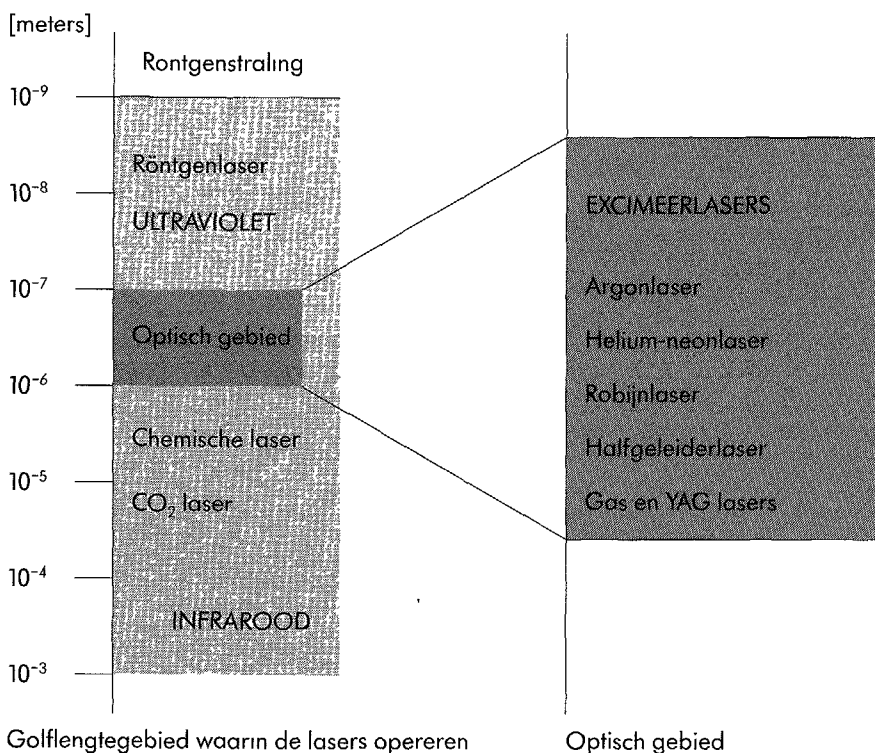
Al deze bewerkingen worden niet met dezelfde laser verricht. Elk laser-type heeft zijn eigen toepassingsgebied. Alvorens tot het principe en het werkgebied van de excimeerlaser te komen zal kort worden ingegaan op de werking van de laser in het algemeen.

Werking van lasers

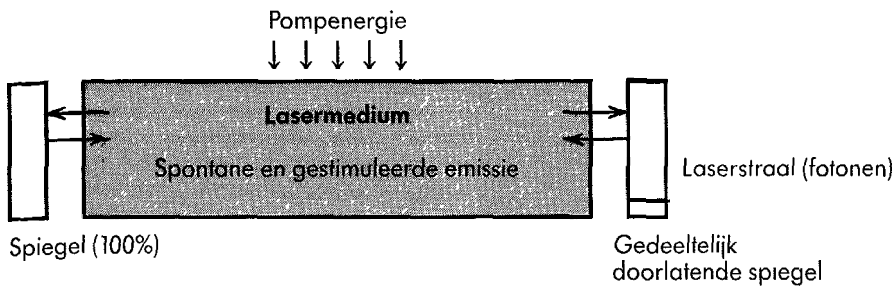
Laser is een afkorting van Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (het versterken van licht door middel van gestimuleerde emissie van straling). Licht bestaat uit golven met een bepaalde golflengte en frequentie. De frequentie

van het licht neemt toe naarmate de golflengte afneemt. Eigenlijk is licht een klein gebied van het elektromagnetisch spectrum, dat varieert van gammastraling tot elektrische stroom; zie *figuur 1*. De energie van elektromagnetische golven kan worden uitgedrukt in kleine energiepakketjes, de fotonen. De energie van het foton is evenredig met de frequentie, vandaar dat gammastraling met een kleine golflengte de hoogste energie heeft. Wanneer we aan een atoom energie toevoeren (in de vorm van fotonen), dan is een foton in staat, wanneer het de juiste (quantum)energie heeft, om een elektron in een andere baan te tillen. Het bevindt zich dan in een geëxciteerde (of aangeslagen) toestand. Vrijwel direct zal het elektron terug vallen naar zijn oorspronkelijke toestand terwijl het een foton uitzendt met dezelfde energie en golflengte als het geabsorbeerde foton. Als het elektron zich in het laagste energieniveau bevindt (de binnenste baan), dan spreken we van de grondtoestand. Het vrijkomen van straling bij het terugvallen naar lagere energieniveaus noemen we (spontane) emissie. In 1917 voorspelde Einstein het effect van de zogenaamde gestimuleerde emissie. Wanneer een elektron zich al in de geëxciteerde toestand bevindt en we bieden een foton met de juiste energie aan, dan zal het zich niet in een nog hoger energieniveau begeven maar juist terugvallen naar een lager niveau en een foton uitzenden, gelijk aan het aangeboden foton, zonder het aangeboden foton te absorberen. We hebben dus nu twee fotonen die elk op hun beurt de volgende geëxciteerde elektronen kunnen laten terugvallen, enz. Zo ontstaat een kettingreactie die stopt wanneer er geen geëxciteerde elektronen meer voorradig zijn.

Zoals reeds eerder gememoreerd bevindt een elektron zich slechts zeer kort in zijn geëxciteerde toestand. Wil het foton een geëxciteerd elektron terug laten vallen en niet, wat meer voor de hand ligt, een elektron van een lager energieniveau exciteren, dan moeten de geëxciteerde elektronen in de meerderheid zijn. Dit verkrijgt men door te "pompen", het in een aangeslagen toestand brengen van atomen en moleculen door licht (lasers, fliitslicht), bundels elektronen, chemische reacties etc. Het gas of kristal waar de geëxciteerde deeltjes zich in bevinden wordt het lasermedium genoemd.



Figuur 1. Overzicht van het elektromagnetisch spectrum. Aangegeven is de golflengte waarbij de diverse lasertypen werken.



Figuur 2 Principe van een laser: resonator en spiegels.

Een lasermidium wordt gepompt door energie die van buitenaf wordt toegevoerd en bevindt zich tussen twee spiegels, waarvan er een gedeeltelijk doorlatend is; zie figuur 2. De spontane emissie die nu optreedt levert fotonen die in verschillende richtingen uittreden. Slechts die in het vlak loodrecht op de spiegels liggen zijn van belang. Zij zorgen voor bruikbare gestimuleerde emissie; het licht met gelijke golflengte en energie (immers de toestanden van de elektronen liggen vast en daarmee de fotonenergie) zal reflecteren tussen de spiegels en opnieuw voor emissie van fotonen zorgen. Een gedeelte zal de (half) doorlatende spiegel verlaten: de uiteindelijke laserbundel. Deze bundel bevat in het algemeen slechts één golflengte, opgelegd door de fotonen.

Resumerend heeft de laserbundel de volgende karakteristieke eigenschappen:

1. Het licht heeft één golflengte (monochromatisch).
2. Het licht is coherent (de lichtgolven hebben dezelfde golflengte, richting en fase).
3. De bundeldivergentie is zeer klein (lichtstralen lopen over grote afstanden nagenoeg evenwijdig).
4. De laserbundel heeft een hoge intensiteit (een groot vermogen per oppervlak en ruimtewinkel).

Verschillende typen lasers

Lasers zijn er in verschillende grootte en sterkte. Ze kunnen gepulste of continue lichtbundels uitzenden en de golflengte kan variëren van microgolven - infrarood licht - zichtbaar licht - ultraviolet licht tot aan röntgenstraling. De eigenschappen van de laser hangen sterk af van het lasermidium en in welke vorm er gepompt wordt.

De eerste laser was gemaakt van een robbijnkristal, waarbij een flitslamp zorgde voor de geëxciteerde (chrom)atomen. In dezelfde familie valt de Nd-YAG laser. Het kristal is in dit geval Yttrium Alumi-

nium Granaat, waaraan neodymium (Nd) is toegevoegd. De neodymiumatomen zenden een laserstraal uit met $1,06 \mu\text{m}$ golflengte. Deze lasers kunnen een hoge intensiteit hebben. Door de goede warmtegeleiding van het kristal kan deze laser zowel continu als gepulst gebruikt worden. Dit lasertype wordt vooral toegepast voor het bewerken van materialen, zoals boren, (punt)lassen en snijden.

Veel gebruikt worden de gaslasers, waarvan de helium-neon laser de bekendste is. Deze laser wordt gepompt door een elektrische spanning tussen twee elektrodes aan te brengen; bij voldoende hoge spanningsverschil tussen de twee elektroden ontstaat een elektrische ontlading, die zorgt voor de excitatie van de heliumatomen. Een ander type gaslaser is de CO_2 -laser. In tegenstelling tot de edelgaslaser kan de CO_2 -laser zeer hoge vermogens leveren. Deze laser heeft een golflengte van $10,6 \mu\text{m}$. Het is de industriële laser bij uitstek en zijn toepassingen liggen in dezelfde lijn als de Nd-YAG laser.

Een duidelijk ander type laser is de chemische. Deze put zijn energie uit chemische reacties. Bij de waterstof-fluoride laser bijvoorbeeld zorgt de reactie van waterstof met fluor voor de benodigde energie. Een zeer krachtige laser is het gevolg, zonder dat men veel elektrische energie hoeft toe te voegen.

De meest spectaculaire opmars heeft de halfgeleider laser gemaakt. Deze laser bevindt zich bijvoorbeeld in de compact disk. De werking berust op de eigenschappen van de halfgeleider. Een elektrische stroom zal in de gedoopte halfgeleider positieve en negatieve ladingdragers exciteren. Bij de recombinatie van de ladingdragers komen fotonen vrij. Wanneer de spontane emissie overheerst hebben we eigenlijk te maken met de LED (light emitting diode) die we kennen van veel elektronische apparaten. Wanneer we in staat zijn de gestimuleerde emissie

te laten overheersen en gebruik maken van (reflecterende) spiegels dan hebben we de halfgeleiderlaser. Het spreekt voor zich dat dit type laser met behulp van halfgeleider technologie gemaakt kan worden en daarmee zeer klein kan zijn.

De kleine afmetingen van de resonator gaat ten koste van de kwaliteit van de bundel, zodat de optiek een belangrijke rol speelt. In de compact disk is de optiek gemaakt van kunststof. De levensduur van de halfgeleider laser is zeer lang, terwijl de kosten gering zijn. De laser heeft wel een gering vermogen.

De nieuwste ontwikkeling op het gebied van lasers is de vrije elektron laser. Het medium dat het licht uitstraalt bestaat slechts uit elektronen (en niet uit atomen) zodat de bundel gestuurd kan worden door magneetvelden. Deze vrije-elektron laser kan een breed golflengtegebied beslaan (men kan de laserbundelfrequentie instellen), terwijl de laser zeer krachtig is. Op het ogenblik bestaat deze laser uitsluitend op laboratoriumschaal en veel onderzoek wordt verricht (ook in Nederland) om hem geschikt te maken voor industrieel gebruik.

Het lasertype waar uitvoeriger op zal worden ingegaan beslaat het gebied van de gas- en de chemische laser: de excimeerlaser

De excimeerlaser

Onder de excimeerlaser verstaan we een groep van hogedruk-gaslasers, die werken in het ultraviolet spectrum. De lasers hebben gemeen dat het lasermidium uit excimeren bestaat. Een excimeer ontstaat uit een chemische reactie van een edelgas met een halogeen (fluor, chloor, broom, jodium). De excimeer kan vrijwel uitsluitend voorkomen in de geëxciteerde toestand. Wanneer een excimeer door spontane of gestimuleerde emissie onder het uitzenden van een foton terugvalt naar een lager energieniveau, ontbindt het molecuul zich in de oorspronkelijke atomen. De vrijkomende fotonen worden niet geabsorbeerd, immers de excimeer "bestaat" niet in zijn grondtoestand! De chemische reactie die de excimeer creëert onttrekt zijn energie aan de elektrische ontlading zoals ook bij de elektrisch aangedreven gaslasers het geval is.

De werking van de excimeerlaser is ontdekt door F.G. Houtermans in 1960. Het was de eerste laser die werkte in het ultraviolet.

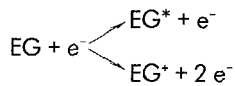
De excimeerlaser

De commerciële excimeerlasers

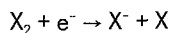
Bij de commerciële excimeerlasers bestaat het edelgas uit argon (Ar), krypton (Kr) of xenon (Xe). Als halogenen worden fluor (F), chloor (Cl) of broom (Br) gebruikt. De geëxciteerde toestand van de heteronucleaire moleculen ArF^* , KrF^* , XeF^* , $XeCl^*$ etc. (de * geeft de aangeslagen toestand weer) wordt eigenlijk een exciplex, terwijl het homonucleaire molecuul AR_2^* of Kr_2^* de excimeer genoemd wordt. In de praktijk wordt echter bij de toepassing als lasermedium uitsluitend de term excimeer gebruikt.

De commerciële excimeerlasers maken gebruik van elektronisch geëxciteerde moleculen als lasermedium. De excimeren worden gevormd via chemische reacties in een gepulste hoogspanningsontlading. De volgende processen vinden plaats:

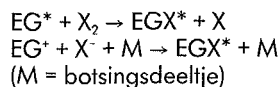
- A. Door de hoogspanningsontlading vindt via botsingen met elektronen een excitatie en/of ionisatie van het edelgas (EG) plaats:



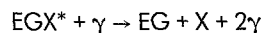
- B. Daarnaast ontbindt het halogeen (X_2) molecuul:



- C. Vervolgens vinden de volgende chemische reacties plaats:



- D. Gevolgd door de laserovergang (gestimuleerde emissie):



waarbij de uitgangsprодукten verkregen worden, zodat opnieuw gestart kan worden.

Het geëxciteerde excimeer heeft een levensduur van enkele nanoseconden. Om een hoge intensiteit te krijgen werkt men met hoge drukken (daardoor ontstaan er sneller opeenvolgende chemische reacties zoals vermeldt onder C) en hoogvermogen ontladingen, die zorgen voor een grotere concentratie van de geëxciteerde geïoniseerde edelgassen.

Het gasmedium van de excimeerlaser bestaat uit 5-10% actief edelgas, 0,1-0,5%

halogeen en een (licht) buffergas zoals helium of neon. De totale druk 2-4 bar.

De resonator met gasvulling wordt geplaatst tussen twee lange parallelle elektroden, die zorgen voor de hoogspanningsontladingen. Voor een goed werkende laser is een elektronen dichtheid van 10^{15} cm^{-3} en een stroomdichtheid van 10^3 A/cm^2 nodig. De ontladingen moeten daarom een doorslagveld hebben van 10-15 kV/cm. Dit legt zijn beperkingen aan de afmetingen van de resonator. Commerciële excimeerlasers hebben een elektrodeafstand van 2-3 cm.

De reacties die door de ontladingen worden opgewekt hebben maar een beperkte levensduur van 10-40 ns, afhankelijk van het model en lasermedium. De herhaalfrequentie kan variëren van 1 Hz tot 1 kHz, waarbij in het laatste geval het geleverde vermogen wel minder wordt. Het vermogen dat excimeerlasers kunnen leveren kan oplopen tot 500 Watt - in 10 ns is dit 5×10^{11} Joule!

De levensduur van het gasmengsel is ook beperkt. Tussen de verschillende elementen vinden chemische reacties plaats, die het laserproces en daarmee de prestaties ongunstig beïnvloeden. Met één gasvulling kunnen tegenwoordig 10 miljoen pulsen geleverd worden, zonder merkbaar energieverlies.

De golflengte van de laserbundel is afhankelijk van de edelgas-halogeen combinatie. De meest gebruikte combinaties met hun specifieke golflengte zijn:

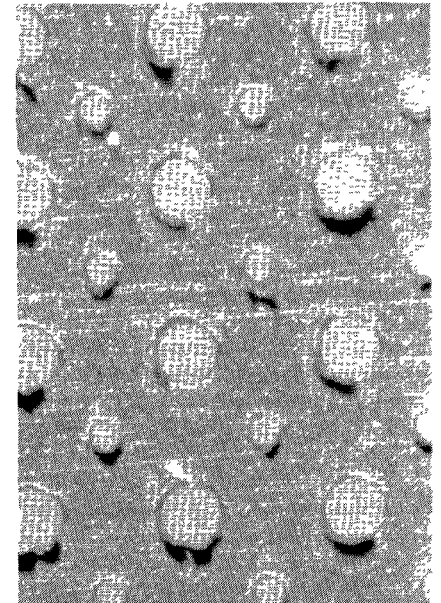
	argon	krypton	xenon
fluor	193	248	351 nm
chloor	175	222	308 nm
broom	161	206	282 nm

Toepassingen van excimeerlasers

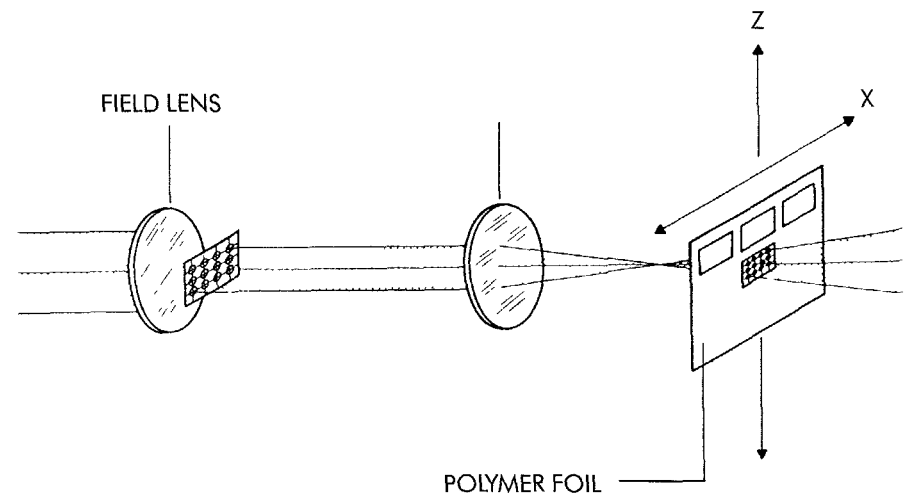
De meeste toepassingen van excimeerlasers vinden plaats in het bewerken van metalen, kunststoffen, glas, keramiek en samengestelde materialen. Met de excimeerlaser kunnen de volgende bewerkingen worden uitgevoerd:

- chemische oppervlakte behandeling,
- verhitten,
- smelten en veredelen,
- verdampen.

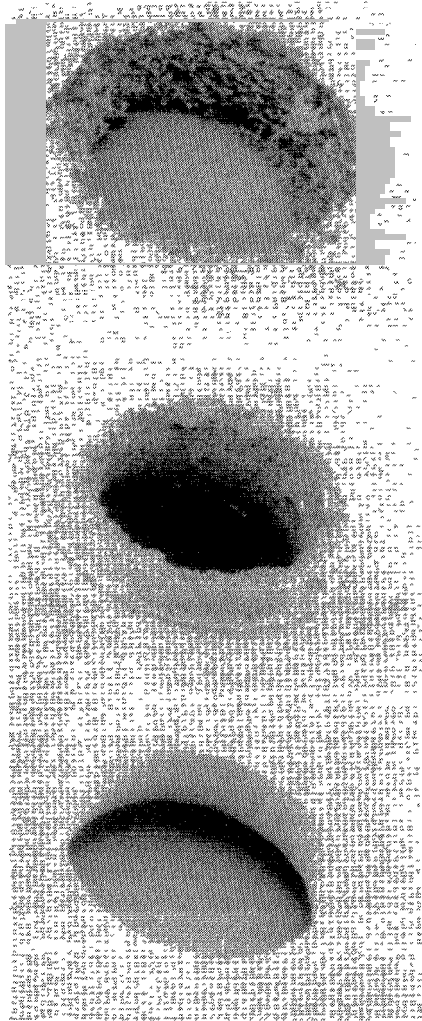
De bewerkingen vinden in de meeste gevallen plaats door met de laserbundel



Figuur 4. Excimeerperforatie in 0,1 mm dik roestvaststaal. De gatdiameters zijn resp. 150 en 50 μm . (Foto Lambda Physik).



Figuur 3. Afbeldingstechniek voor het boren van gaatjes of het markeren en graveren van materialen.



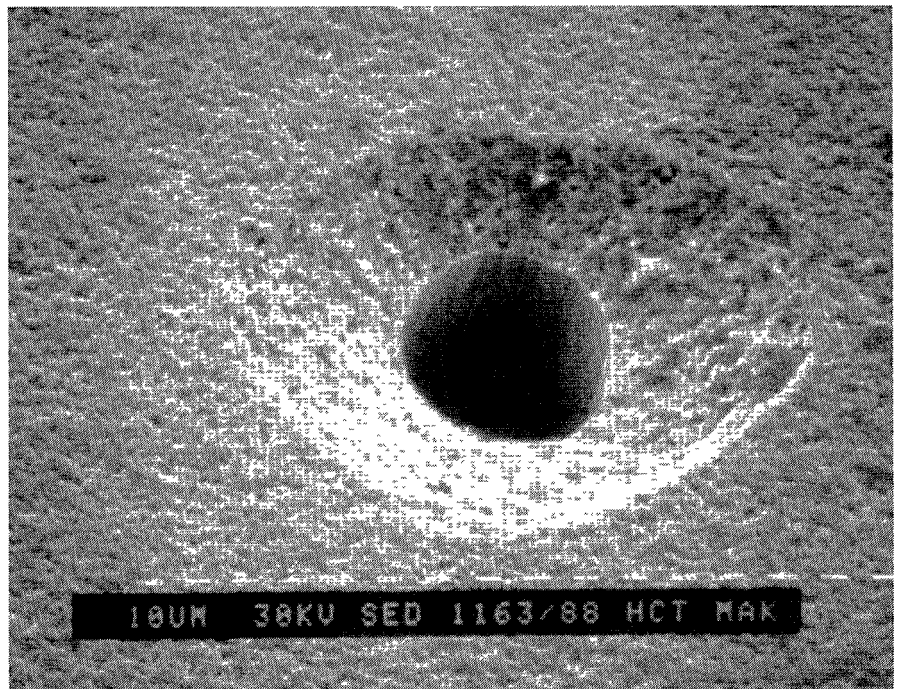
Figuur 5. Verschil in oppervlakteruwheid bij het boren van gaten in kunststoffolie. Nr. 1 met een Nd:YAG-laser; nr. 2 met een CO₂ gepulste laser en nr. 3 met een excimeerlaser.

een masker met behulp van een lenzenstelsel af te beelden op het te bewerken oppervlak - zie *figuur 3* - of een masker direct op het oppervlak te plaatsen.

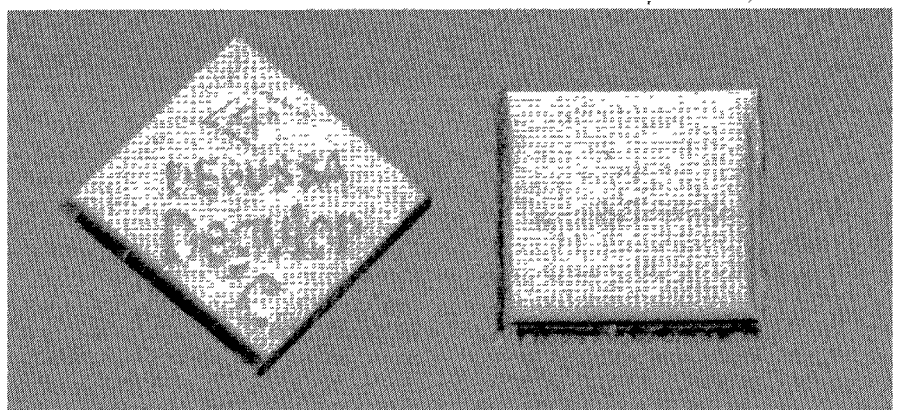
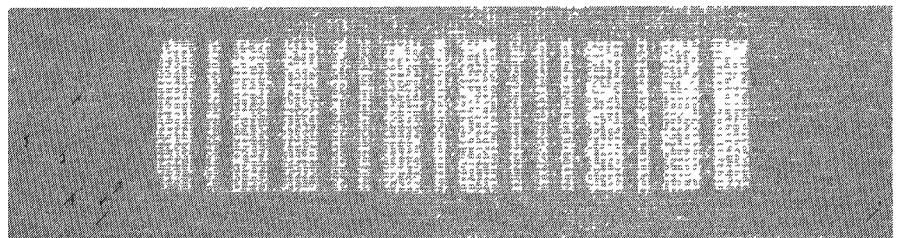
Voor het bewerken van metalen maakt men gebruik van het feit dat de absorptiecoëfficiënt van een materiaal in het ultraviolette spectrum veel groter is dan in de infrarode (het gebied van andere lasertypen). Deze eigenschap geldt vooral voor zilver, goud en koper. De laserbundel wordt vrijwel geheel geabsorbeerd in een oppervlaktelaag van 50 nm, terwijl door de korte duur van de puls het materiaal slechts tot een dikte van 1 μm wordt verhit. Men is in staat om zeer precies laag voor laag te bewerken. Dit kan inhouden verwarmen, smelten maar ook verdampen. Op deze wijze kan bijvoorbeeld met de laser geboord worden. Voor een gat van 100 μm in 1 mm staalplaat zijn 500

pulsen van 200 mJ elk nodig. *Figuur 4* laat een perforatie van roestvaststalen-foolie van 0,1 mm zien met gaten van 150 en 50 μm . Ook kunststoffen laten zich op deze wijze bewerken. Een goed voorbeeld is Kaptonfolie. Deze folie, bekend door zijn gebruik in sterkstroomtoepassingen wegens zijn goede isolerende en thermische eigenschappen, laat zich uitstekend be-

werken met de excimeerlaser. Door gebruik te maken van een masker en een lenzenstelsel kunnen duizenden gaten tegelijkertijd worden geschoten. *Figuur 5* geeft het verschil aan in oppervlakteruwheid tussen de verschillende typen lasers die voor dit soort doeleinden gebruikt worden. Met een dergelijke techniek worden op dit moment scheerbladen (van



Figuur 6. Geboord gat in AlO₂ van 90 μm met een KrF laser. (Foto Lambda Physik).

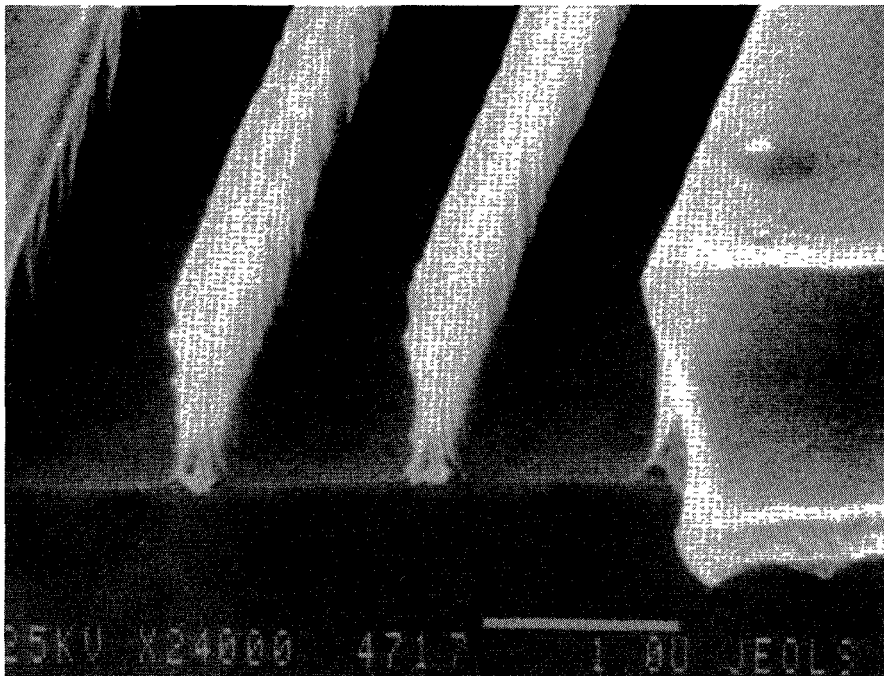


Figuur 7. Markeren en graveren van materialen met behulp van de Lambda Mark.

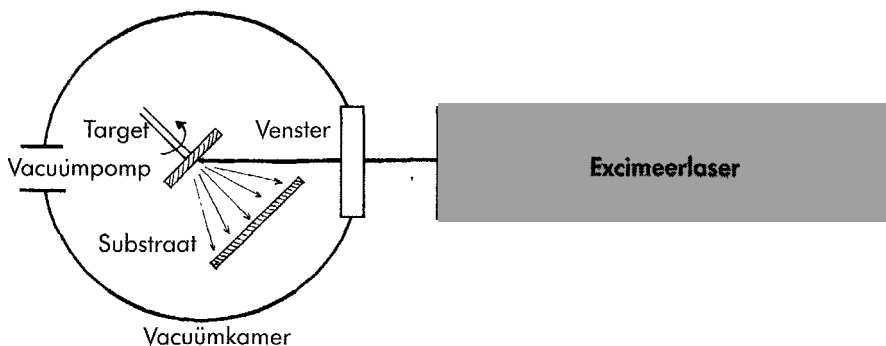
De excimeerlaser

kunststof) vervaardigd. Het boren in keramische materialen levert ook zeer goede resultaten op. In *figuur 6* is een gat van 90 μm in aluminiumoxyde afgebeeld. Let vooral op de zeer gladde wand. Met behulp van de excimeerlaser is het mogelijk om diamanten van zeer kleine gaatjes te voorzien. Een nieuw toepassingsgebied dat met de komst van de commerciële excimeerlaser is geïntroduceerd is het markeren van materialen. Door de geringe dieptewerking van de laserbundel is het mogelijk materialen te bewerken zonder dat (thermische) spanningen ontstaan. Speciaal voor glas en keramiek is deze eigenschap belangrijk. Bij kunststoffen speelt nog een ander effect een grote rol, namelijk fotochemische oppervlakteveranderingen. Zonder thermische nevenbewerking ver-

andert de kleur van de kunststoffen wanneer ze bewerkt worden met de laserbundel. Lambda Physik heeft speciaal voor markeringsdoeleinden een excimeerlaser op de markt gebracht. In *figuur 7* staan enkele voorbeelden weergegeven. Een geheel nieuw gebied is de microlithografie. Met behulp van een excimeerlaser is het mogelijk om optische microlithografie te bedrijven met een resolutie van 0,3 μm ; zie *figuur 8*. Dit stelt wel extra eisen aan de kwaliteit van de optiek en de laserbundel. De bandbreedte van de laserbundel moet zo klein mogelijk zijn om afbeeldingsfouten te minimaliseren. Daarnaast worden hoge eisen gesteld aan de stabiliteit van de laser, zodat reproduceerbaar gewerk kan worden, immers in de lithografie is de belichtingstijd van groot belang.



Figuur 8. Een elektronenmikroscoop opname van een patroon die door middel van fotolithografie is verkregen met behulp van een Lambda Physik excimeerlaser. De resolutie is in dit geval 0,2 μm . (Foto Carl Süß, München).



Figuur 9. Opstelling voor het vervaardigen van dunne films van de hogetemperatuur supergeleiders met behulp van laserablatie.

Ook atmosferisch onderzoek wordt met behulp van excimeerlasers verricht. Het ozongehalte in de atmosfeer is van groot belang. Ozon zorgt voor de absorptie van de UV straling van de zon. Door klimatologische veranderingen en verregaande milieuverontreiniging wordt deze ozonlaag aangetast. Een bekend verschijnsel is het gat in de ozonlaag rond de Zuidpool. De veranderingen in de ozonconcentratie worden tegenwoordig ook geobserveerd met behulp van excimeerlasers. Het ultraviolette gebied waarin de laser werkzaam is en het hoge vermogen (goede signaal/ruis verhouding) maken de excimeerlaser zeer geschikt voor dit onderzoek. Het is mogelijk om via signaalbewerkingstechnieken een verticaal ozonprofiel te maken door met behulp van een telescoop de reflecterende laserbundel te bestuderen. Hierbij worden opnieuw hoge eisen gesteld aan de bandbreedte van de laserbundel, immers metingen op de zuidpool worden (op vier maanden na) bij zonlicht (dat ook UV-straling bevat) uitgevoerd.

Een laatste ontwikkeling die niet onvermeld dient te worden is het vervaardigen van dunne lagen met behulp van de excimeerlaser. Bij voldoende hoge energie van de laserbundel is men in staat om materiaal (het target) te verdampen. De temperatuur kan daarbij oplopen tot 10.000 $^{\circ}\text{C}$. De deeltjes die het target verlaten bestaan uit atomen, moleculen en clusters, al dan niet in aangeslagen toestand. Doordat de deeltjes zich een weg banen door de laserbundel worden sommige nog extra geëxciteerd. Wanneer we dit proces in vacuüm laten afspelen zijn de deeltjes in staat om tientallen centimeters af te leggen. De aangeslagen deeltjes zullen terugvallen onder het uitzenden van fotonen en er ontstaat een pluim (of plasma). Door een dragermateriaal (substraat) in het plasma te plaatsen, groeit er een laag: de dunne film. *Figuur 9* toont een opstelling die gebruikt wordt om de nieuwe hogetemperatuur supergeleiders te maken. Met deze techniek (ook wel laserablatie genoemd) zijn zeer goede resultaten bereikt. Het is een snelle en doeltreffende manier voor het vervaardigen van dunne lagen. Aangezien deze techniek eigenlijk nog maar in de kinderschoenen staat mogen we er veel van verwachten.

Concluderend mag worden gesteld dat het toepassingsgebied van de excimeerlaser steeds verder groeit. De excimeerlaser is niet meer weg te denken uit de hedendaagse technologie.

Plasmaspuiten van vrijstaande voorwerpen

Ing. G.A. te Raa, Nederlandse Philips Bedrijven BV.

Plasmaspuiten is een oppervlaktebedekkingstechniek die gewoonlijk wordt gebruikt voor het aanbrengen van goedhechtende lagen.

Het is evenwel mogelijk om zodanig op een mal of een doorn te spuiten dat de gespoten laag naderhand als een vrijstaande schaal of schil kan worden verwijderd. Deze werkwijze maakt het mogelijk om op een eenvoudige manier vrijstaande voorwerpen te maken van hoogsmeltende keramische materialen.

Een aantal voor- en nadelen van deze methode zullen nader worden besproken.

Inleiding

Eén van de belangrijkste hindernissen, die een grootschalige toepassing van technische keramieken momenteel in de weg staat, is ongetwijfeld de moeilijke en kostbare bewerking van deze materialen. Met de conventionele fabricageprocessen, die momenteel voor technische keramiek beschikbaar zijn, zijn dunwandige produkten met hoge vorm- en maatnauwkeurigheid nauwelijks maakbaar. Thermisch spuiten biedt een mogelijkheid om dit soort produkten op een relatief eenvoudige manier te maken. Omdat voor keramische materialen meestal de plasmaspuittechniek wordt gebruikt, zal in het vervolg steeds over plasmaspuiten worden gesproken.

Plasmaspuiten van keramische materialen

Keramische materialen die tegenwoordig veel worden verspoten zijn:

● Carbides

Deze worden toegepast om hun grote weerstand tegen slijtage. De meest gebruikte zijn W-carbides en Cr-carbides. Deze materialen worden bijna altijd in combinatie met een metallische binder gebruikt, Co voor W- en NiCr voor Cr-carbide.

● Oxydes

- Al-oxyde.

Wordt gebruikt als slijvast materiaal. Ter verbetering van de eigenschappen worden vaak enkele procenten Ti-dioxyde toegevoegd. In zuivere

toestand heeft het goede elektrische isolatie-eigenschappen bij hoge temperatuur.

- Zr-oxyde.

Dit oxyde wordt uitsluitend in gestabiliseerde vorm toegepast, meestal als een warmte-isolerende laag - in de angelsaksische literatuur "thermal barrier coating" genoemd. Als stabilisatoren worden Ca-oxyde, Mg-oxyde en Yt-oxyde gebruikt.

- Cr-oxyde.

Dit materiaal is niet alleen slijvast, maar het heeft zeer goede loopeigenschappen, ook tegen zichzelf.

De laagdiktes van plasmagespoten keramische lagen liggen in de praktijk meestal tussen 0,10 en 0,25 mm. Onder bepaalde omstandigheden is het echter ook mogelijk om lagen met een dikte van 1 à 2 mm te spuiten.

Evenals bij alle andere oppervlaktebedekkingsprocessen is het de normale procedure om goedhechtende lagen op een substraat aan te brengen.

Plasmaspuiten van vrijstaande, keramische voorwerpen

Het is echter mogelijk om zodanig op een mal of doorn te spuiten dat slechts weinig hechting ontstaat en de opgebrachte laag naderhand als een schil van de doorn kan worden verwijderd. Deze werkwijze biedt een simpele methode om dunwandige, keramische produkten met een hoge vorm- en maatnauwkeurigheid te maken. In principe kan het gevormde produkt in de gespoten toestand worden gebruikt. De dichtheid ligt, afhankelijk van de omstandigheden, tussen ca. 85 en 97%. Door een nasinterbehandeling kunnen de eigenschappen van het produkt nog verder verbeterd worden. Vooral de sterkte neemt flink toe. Door de hoge uitgangsdichtheid is de krimp (ca. 1% of minder) tijdens de nasinteren laag in vergelijking met de normale krimp, die tijdens het sinteren van geperste of geëxtudeerde keramische produkten ontstaat. De werkwijze voor het spuiten van een schil is als volgt:

- Voorverwarmen van de mal of doorn tot ca. 200 - 300 graden Celsius.

- Het aanbrengen van een zoutlaag op de doorn door deze met behulp van een verfspuitpistool te bedekken met een verzadigde keukenzoutoplossing. Doordat de doorn heet is, verdampt

het water en blijft een zoutfilm achter.

- Het opspuiten van de keramische laag op de reeds aanwezige zoutlaag.

- Wanneer de laag de gewenste dikte heeft bereikt, het geheel af laten koelen en onderdommelen in water.

- Omdat de laag nog een zekere restporositeit heeft, zal de zoutfilm na verloop van tijd geheel of gedeeltelijk oplossen en kan de gespoten keramische schil van de doorn worden verwijderd. De doorn kan opnieuw worden gebruikt.

De doorn wordt gewoonlijk gemaakt van messing, aluminium of staal. Vaak wordt messing gebruikt, dat een hoge uitzettingscoëfficiënt heeft. Wanneer bij een relatief hoge substraattemperatuur wordt gespoten, zal de messing doorn, naar verhouding, bij de latere afkoeling sterk krimpen. Dit vergemakkelijkt het lossen van de schil.

Van bijzonder groot belang is de temperatuurbeheersing tijdens het spuiten. Koeling tijdens het spuiten is soms noodzakelijk, maar altijd zeer kritisch. Zowel teveel als te weinig koeling geven beide aanleiding tot het ontstaan van scheuren in of breuk van de opgespoten keramische laag. Het probleem is ervoor te zorgen dat het gehele werkstuk een gelijkmatige temperatuur heeft een nood tijdens het spuiten. Lokale oververhittingen zijn altijd desastreus.

De eis van een gelijkmatige temperatuurverdeling tijdens het spuiten, is de belangrijkste reden waarom rotatiesymmetrische vormen een sterke voorkeur hebben bij het spuiten van vrijstaande voorwerpen. Andere vormen zijn theoretisch wel mogelijk, maar geven in de praktijk zeer veel problemen. Vooral bij de wat dikkere lagen (meer dan 0,2 mm) is het een hele kunst om de zaak heel te houden.

Voorbeelden van gespoten keramische produkten

Figuur 1 geeft de indruk wat voor produkten zoal door spuiten kunnen worden gemaakt.

Een plasmagespoten laag van Al-oxyde heeft vaak een blauwe kleur. In dat geval is een Al-oxyde spuitpoeder gebruikt, waaraan enkele procenten Ti-dioxyde zijn toegevoegd. Tijdens het spuiten verliest het Ti-dioxyde iets zuurstof, zodat het niet meer stoichiometrisch is. Hierdoor ontstaat de blauwe kleur. Indien naderhand, bij een gloeibehandeling in lucht of