

Leo H.J.F. Beckmann *De toepassing van lasers in de industriële materiaalbewerking is, na de uitvinding van de laser in 1960, vrij spoedig op gang gekomen en vertoont sindsdien een stijgende lijn. Het marktaandeel van lasers voor materiaalbewerking is opgeklommen van ongeveer 20% in 1990 naar bijna 50% in 1995 van de geldswaarde van de wereldwijd verkochte lasers, bij een totale markt die door de jaren heen bij ruim 1 miljard dollar lag.*

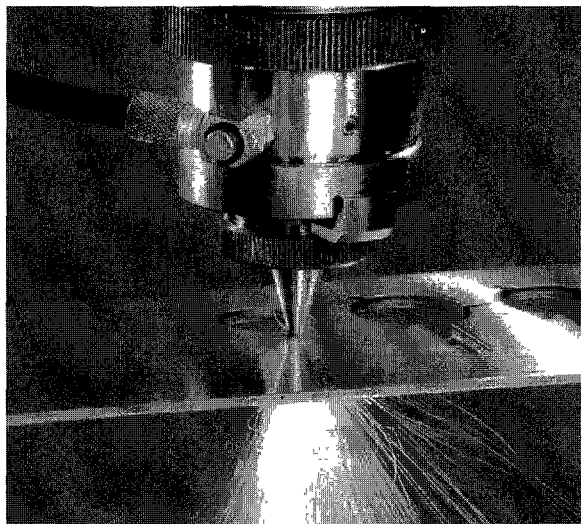
Zeker tegen de achtergrond van een wereldwijd stagnerende economie is een groei van 20% per jaar spectaculair. Dit heeft goede redenen: laserbewerking is niet alleen een hoogwaardige productietechniek, maar biedt door zijn flexibiliteit in bewerkingssnelheid en/of kwaliteit de juiste voorwaarden voor kosteneffectieve productie.

Hierbij zijn drie kanttekeningen te plaatsen:

1. Het lijkt geen twijfel, dat een aantal breed ingevoerde laserbewerkingstechnieken, zoals het snijden van plaatstaal, het markeren en het fijnlassen van elektronische producten, in zo ruime mate ingevoerd zijn, dat een zekere verzadiging van deze markten bereikt is of binnenkort kan worden verwacht. De concurrentie zal daardoor verscherpen.
2. De voordelen van het overgaan op laserbewerking waren in het verleden meestal zo duidelijk, dat ook suboptimale oplossingen geaccepteerd werden. Dit versnelde de invoering over een breed gebied. Onder toenemende druk van de concurrentie zullen de processen geoptimaliseerd moeten worden in de richting van snellere bewerking en/of hogere kwaliteit.

3. Een aantal potentiele laserbewerkingen heeft nog geen brede toepassing gevonden. De redenen lopen uiteen. Soms betreft het grensgevallen van op zich bekende toepassingsgebieden, zoals het snijden van dunne plaat, maar dan met zeer hoge snelheid, of het lassen van producten, maar dan op moeilijk bereikbare plaatsen. Dat vergt aangepaste technieken waarvoor volledig begrip van de probleemstelling en de technische mogelijkheden noodzakelijk is om tot een goede oplossing te komen.

In de nabije toekomst zal meer aandacht moeten worden geschonken aan de optimalisatie van bestaande bewerkingssystemen en nieuw in te voeren processen. Hoewel nog onvoldoende onderkend, zal de keuze van de optiek zal daarin een cruciale rol spelen.



Snijden van CrNi band zonder oxidatie



Dichtlassen van een peacemaker behuizing uit titanium

Optiek

De optiek heeft de rol de in de laser opgewekte stralenbundel zodanig te manipuleren en te modificeren, dat op de plaats van de beoogde bewerking de gewenste energieverdeling bereikt wordt. Ik geef hier bewust een wat brede definitie, omdat de taak en de mogelijkheden van de optiek vaak onderschat worden. Men beperkt zich veelal tot wat primitieve methoden van focuseren van laserstraling. De laser is een zeer hoogwaardige stralingsbron en het zou vanzelfsprekend moeten zijn dat die waarde zoveel mogelijk wordt benut door de juiste keuze van de optiek.

Systeemaspekten van optieken voor industriële lasers.

Welke lasers zijn industrieel inzetbaar?

Voor toepassingen in de industriële materiaalbewerking verwachten wij van een laser, dat hij vanuit zijn opwekkingmechanisme geschikt is voor opschaling naar het

gewenste vermogen, gekoppeld aan een redelijk energetisch rendement. Van de duizenden ooit gerealiseerde lasers voldoen slechts zeer weinig lasertypen aan deze volstrekt gewone eisen.

- de CO₂-laser, een gaslaser die straling met een golflengte $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ levert. Zijn energetisch rendement van circa 15 % is voor laserbegrippen uitmuntend. Het is de enige laser die voor (continu) afgegeven vermogens van meer dan 10 kW kan worden gebouwd. Verreweg het merendeel van de thans geïnstalleerde CO₂-lasers werkt evenwel in het vermogensgebied onder 3 kW.
- de Nd-YAG-laser, een vaste-stof laser gebaseerd op Nd-ionen, die opgelost zijn in een kristal van Yttrium-Aluminium-Granaat, (afgekort YAG, en gebruikt vanwege de gunstige warmtegeleiding). Deze laser levert straling van 1,06 μm golflengte, heeft minder dan 3 % energetisch rendement. Het gemiddelde vermogen is enkele honderden Watts die veelal in de vorm van kortstondige pulsen wordt geleverd, met piekvermogens die kunnen variëren tussen 1 en 1000 kW. Sinds enkele jaren komen ook continu stralende Nd-Yag-lasers met vermogens van twee en recent zelfs 3 kilowatt beschikbaar.
- de excimeerlasers, een familie van gaslasers op basis van moleculen uit een halogeen (F, Cl etc.) en een edelgas (Ar, Kr etc.) die alleen in aangeslagen toe-

stand bestaan, en die ultraviolette straling met een energetisch rendement van 2 à 4% leveren. De straling bestaat altijd uit zeer kortstondige pulsen van enkele tientallen nanoseconden en heeft daardoor zeer hoge piekvermogens (meer dan 10⁷ Watt). De uitgezonden golflengte hangt af van de samenstelling van het gas, waarbij vooral KrF ($\lambda=248 \text{ nm}$) en ArF ($\lambda=193 \text{ nm}$) van belang zijn.

Gezamenlijke aspecten van laseroptiek

De drie hierboven genoemde lasers opereren in sterk uiteenlopende golflengtegebieden. Hetgeen zijn weerslag vindt in de voor toepassingen van deze lasers gebruikte optieken. Daarnaast zijn er gezamenlijke aspecten die voortkomen uit de grote (piek-) vermogens van laserbundels. Alle optische oppervlakken dienen goed schoon

en vrij van beschadiging te zijn, om opwarming en de daaruit resulterende spanningen met kans op breuk te voorkomen. De met geheel uit te sluiten restabsorptie van laserstra-

De mogelijkheden van de optiek worden vaak onderschat: men beperkt zich veelal tot wat primitieve methoden van focuseren van laserstraling.

ling in optische componenten, maakt het met name bij de langgolvlige straling van een CO₂-laser nodig de optieken geforceerd te koelen. En wel zodanig, dat er geen optisch onaanvaardbare deformaties van de optische vlakken optreden. De diameters van optieken voor hoogvermogen-lasers moeten tevens altijd ruim worden bemeten, teneinde absorptie aan randen en in vattingen van de optieken te vermijden. En daar waar het gevaar dat een laserbundel op de rand van een optisch systeem terecht komt niet geheel kan worden uitgesloten, moet een gekoeld diafragma voor deze optiek geplaatst worden, zonder thermisch contact met die optiek.

Bij alle optiek voor hoge vermogens doet men er goed aan, tussenliggende focu te vermijden en geen optische elementen in sterk gereduceerde bundeldiameters te plaatsen. De voor alle optiek geldige aanbeveling om de benodigde eigenschappen met een minimum aan optische componenten te verkrijgen, verdient in het geval van laseroptiek extra aandacht vanwege de noodzaak van koeling en/of de kosten van de benodigde optische materialen.

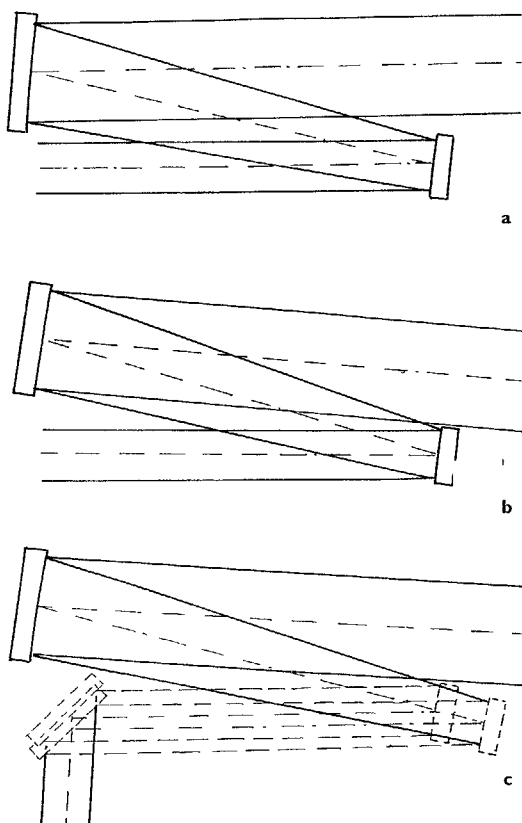
Optieken voor CO₂-lasers

Bundeltransport en positionering

De schaarste en de hoge kosten van optische materialen voor de infrarode straling van de CO₂-laser bepalen in

grote lijnen de opbouw van de bewerkingsystemen. De positionering van de stralenbundel van de bijna altijd stationair opgestelde laser geschiedt voornamelijk met behulp van spiegels, waarbij veelal straalwegen in de orde van 10 m tot aan het werkstuk moeten worden overbrugd. Dat vergt spiegels van hoge kwaliteit, zowel voor de restabsorptie als de vlakheid. Tussen laser en werkstation wordt vaak een telescoop geplaatst, en wel om twee redenen:

- ter vermindering van radiale bundelverplaatsing ten gevolge van fluctuaties in de uitrechoek van de bundel uit de laser,
- ter vermindering van de variatie van de bundeldiameter langs de bundelas.



Figuur 1 Telescopen ('Hollandse kijkers') voor bundelverbreiding en positionering van de stralentaal van een CO₂-laser. Uitvoering a gebruikt paraboloidische spiegels waardoor de in- en uitgaande assen aan elkaar evenwijdig zijn. Uitvoering b gebruikt sferische spiegels, en de assen staan onder een hoek ter compensatie van astigmatisme. Bij c is de spiegelafstand instelbaar, een hulpspiegel dient om de daarbij optredende zijdelingse bundelverplaatsing te compenseren, en tevens de totale afbuighoek op precies 90 graden te brengen (uit [1]).

Het is echter ook mogelijk gebruik te maken van 'zoom-lenzen'. Deze aanpak heeft in de praktijk nog nauwelijks ingang gevonden, vermoedelijk vanwege onbekendheid met deze materie bij zowel gebruikers als leveranciers van lasersystemen.

Bij een gegeven openingshoek van de uiteindelijke focuseringsoptiek, kan een bundel met een vergrote diameter voordelig zijn omdat een grotere afstand tussen deze optiek en het werkstuk gerealiseerd wordt. Dit voordeel moet afgewogen worden tegen de kosten (en/of het gewicht) van een grotere focuseringsoptiek en kan

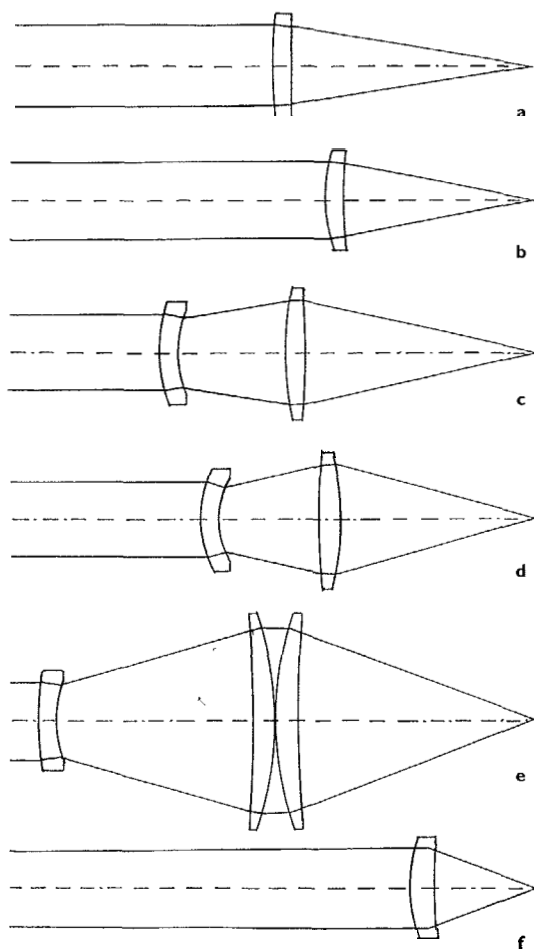
een extra verkleinende telescoop vlak voor de focuseringsoptiek wenselijk maken.

Telescopen

Bij laserapplicaties wordt een telescoop in de stralengang ook wel als bundelverbreder (c.q. -versmaller) aangeduid, aangezien het bereiken van de gewenste bundeldiameter zijn voornaamste functie is. Van de twee bekende typen, volgens Kepler en volgens Galilei, heeft de laatste, die ook als 'Hollandse kijker' bekend staat, de voorkeur vanwege zijn combinatie van een negatief en een positief optisch element, hetgeen een tussenfocus vermijdt en kort bouwt. Hoewel voor kleine vermogens ook lenzen bruikbaar zijn, prefereren men hier doorgaans spiegels vanwege de betere thermische stabiliteit, en wordt de noodzakelijkerwijs geknikte stralengang op de koop toe genomen. Alleen als de spiegels een paraboloidische vorm hebben, is de uitgaande as evenwijdig aan de ingaande, bij gebruik van (goedkopere!) sferische spiegels staan deze assen onder een kleine hoek ter compensatie van astigmatisme. Door de afstand tussen de spiegels binnen een klein gebied te variëren kan de telescoop zodanig afgesteld worden, dat de stralentaal van de uitredende bundel op de gewenste axiale plaats terecht komt. De dan onvermijdelijke zijdelingse bundelverplaatsing moet met een beweegbare extra spiegel gecompenseerd worden. Het geheel wordt vaak zodanig ontworpen, dat de totale afbuighoek 90 graden bedraagt, zie figuur 1.

Lenzen voor CO₂-lasers

Tot vermogens van ongeveer 3 kW kan CO₂-laserstraling gemakkelijk met lenzen worden gemanipuleerd en vooral gefocuseerd. Dat biedt het voordeel van een rechthoekige opstelling. De lens zal, bij het snijden of lassen, tevens dienst doen als afslutend drukvenster voor het benodigde procesgas. Het materiaal voor dergelijke lenzen is thans nagenoeg uitsluitend zink-selenide (ZnSe). ZnSe van hoge kwaliteit, vaak omschreven als 'laser gra-



Figuur 2 Lenssystemen voor het focuseren van CO_2 -laserstraling met van boven naar beneden toenemende numerieke apertuur. Bij a kan vanwege de geringe apertuur worden volstaan met een plano-convex-lens, b vergt een optimaal gevormde meniscuslens. Aberratievrij gedrag bij nog hogere apertuur wordt verkregen met twee lenzen (c en d) in een zogenaamd retrofocus systeem, waarbij tevens de afstand tussen lens en focus (=werkstuk) voldoende groot kan blijven. Met drie lenzen, e, kan de numerieke apertuur nog verder opgevoerd worden. De onderste lens, f, heeft een asferisch vlak, waardoor ook deze lens praktisch aberratievrij is, maar de afstand tussen lens en focus is dan erg klein (uit [1]).

de' en een absorptie-coëfficiënt van $<0,0005 \text{ cm}^{-1}$ wordt door verschillende leveranciers in de handel gebracht. Samen met de verhezen in de – voor refractieve optiek onmisbare – anti-reflex-coating zal een goede ZnSe-lens minder dan 0,15 % van de opvallende straling absorberen.

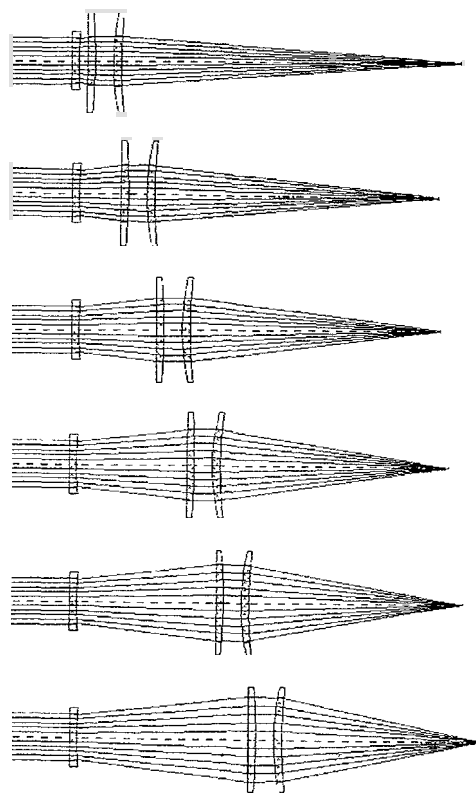
Door de hoge brekingsindex van ZnSe ($n=2,4028$ bij $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) is het mogelijk, reeds met een enkele lens redelijk aberratievrije focussing te bereiken, bij de in de praktijk hoofdzakelijk gebruikte openingshoeken van de numerieke apertuur ($\sin U'$) tot circa 0,12, overeenkomend met $f/4$.

Opties voor grotere numerieke apertuur

Er zijn verschillende opties om de hierboven aangegeven grens voorbij te gaan. Eén ervan is het gebruik van diffractie-optiek, dergelijke optische elementen zijn thans commercieel verkrijgbaar. Een tweede mogelijkheid is, één van de optische vlakken van de lens te voorzien van een asferische vorm, waardoor de sferische aberratie geheel wordt gecorrigeerd. Hetzelfde is mogelijk door passend ontworpen systemen met twee of meer (sferische) lenzen. Dergelijke ontwerpen kunnen van het zogenaamde retro-focus type zijn [2], met als voordeel, dat de uitstekende correctie van de aberraties gepaard gaat met een verlenging van de afstand tussen optiek en werkstuk, zie figuur 2.

Gebruik van zoom-optiek

Voor optimale procesvoering bij het snijden met een laser, dient de (Rayleigh-)lengte van de door focussering verkregen stralentaalje te worden aangepast aan de dikte van het te snijden materiaal. In de praktijk wordt uit een kleine reeks van lenzen met vaste brandpuntsafstand die lens gekozen, die redelijk in de buurt van de



Figuur 3 Ter aanpassing aan de materiaaldikte bij het snijden met een CO_2 -laser kan een zoom-optiek dienen, waarmee de numerieke apertuur over meer dan een factor drie (en de Rayleigh-lengte over een factor 10) kan worden gevarieerd. Over het gehele gebied blijft de afstand tot aan het werkstuk relatief groot (uit [3]).

optimale numerieke apertuur en bijbehorende brandpuntsafstand komt

Het is echter ook mogelijk gebruik te maken van 'zoom-lenzen' (lenssystemen met continue variabele brandpuntsafstand), zoals die ook in de fotografie veel worden toegepast. Haalbaarheid en voordeel van deze aanpak zijn aangetoond [3]. Dergelijke systemen met een zoom-factor van ruim 3 (de bijbehorende Rayleigh-lengte varieert dan over een ordegrrootte) hebben over het gehele gebied verwaarloosbare aberraties. Ze bevatten slechts drie sferische lenscomponenten (twee, als er een asferisch vlak wordt toegepast), zie figuur 3. Deze aanpak heeft in de praktijk nog nauwelijks ingang gevonden, vermoedelijk vanwege onbekendheid met deze materie bij zowel gebruikers als leveranciers van lasersystemen.

Thermische effecten in (ZnSe-)lenzen

De absorptie van CO₂-laserstraling in een ZnSe-lens veroorzaakt opwarming van de lens. Als deze, zoals algemeen gebruikelijk, aan de rand wordt gekoeld, ontstaat een radiale temperatuurgradient. In een nieuwe en perfect schone lens uit kwalitatief hoogwaardig materiaal is het effect klein, maar het neemt sterk toe bij een enigszins vervuilde of beschadigde lens, en wordt dan bepalend voor de levensduur van de lens.

Het voornaamste gevolg is een verkorting van de brandpuntsafstand. De temperatuurgradient veroorzaakt in het lensmateriaal een gradient van de brekingsindex met een gekromd stralenverloop als gevolg. Er is een eenvoudig model opgesteld door Tangelder [4] en Beckmann [5], dat de

experimentele waarden goed weergeeft. In een typische situatie waarbij 20 W in een lens wordt geabsorbeerd (1 % van een 2 kW laserbundel) zal het centrum van de lens een temperatuursverhoging van 25 K ondergaan. Na bereiken van thermisch evenwicht, hetgeen circa 30 seconden vergt, zal de stralentaal van de gefocuseerde bundel met een bedrag overeenkomend met één Rayleigh-lengte axiaal opgeschoven zijn. Dit is meer dan in een snijtoepassing aanvaardbaar is.

De indruk bestaat, dat opwarming van lenzen en de bijbehorende thermische gradienten als oorzaak van slechte reproduceerbaarheid van processen vaak onderschat worden, vooral ook omdat dit thema in de literatuur tot nog toe weinig aandacht heeft gekregen.

Spiegelsystemen voor focussing van CO₂-laserstraling

Boven 3 kW, maar onder bepaalde omstandigheden ook bij kleinere vermogens, verdienen focuseringsystemen op basis van spiegels de voorkeur. En wel vanwege de uitstekende warmtegeleiding van de voor deze spiegels in aanmerking komende materialen, met name koper, en efficiënte geometrische mogelijkheden voor het aanbrengen van koelkanalen. Deze zijn in wezen onafhankelijk van de grootte van de te koelen spiegel, waardoor spiegels tot meer dan 10 kW per cm² belast kunnen worden. Bij grote bundeldiameters, die bij lasers met zeer hoge vermogens kunnen oplopen tot 80 mm, zijn er bovendien aanzienlijke kostenvoordelen ten opzichte van refractieve optiek.

Koper, het preferente materiaal voor laserspiegels, heeft bij de golflengte van de CO₂-laser een hoge reflectie (> 99 %), welke door passende coating nog verder kan worden opgevoerd. Waar de geringe hardheid en dus gevoeligheid voor krassen bij het schoonmaken een probleem kan vormen, of in toepassing waar spatters en rook het spiegeloppervlak kunnen aantasten, wordt weleens gebruik gemaakt van spiegels uit molybdeen, een zeer hard en duurzaam metaal, met een reflectie (ongecoat) van circa 98 %.

Aangezien de focussing van een laserbundel meestal slechts een zeer klein veld in de onmiddellijke nabijheid van de optische as betreft, zou men zich gemakkelijk kunnen laten verleiden om ook uitsluitend de optische aberratie voor axiale straling in beschouwing te nemen. Er moet evenwel worden bedacht, dat spiegelsystemen in laserninstallaties altijd in

De indruk bestaat, dat opwarming van lenzen en de bijbehorende thermische gradienten als oorzaak van slechte reproduceerbaarheid van processen vaak onderschat worden.

een 'off-axis'-configuratie moeten fungeren, teneinde een centrale schaduw en bijbehorend verlies te vermijden. Bij off-axis configuraties is het echter moeilijk en vergt een bewerkelijke justage, om de paralleliteit met de optische as te verzekeren. Men doet er dan ook goed aan, rekening te houden met de aberraties bij een veldhoek van 1 à 2 milliradiaal ten opzichte van de optische as, en bij voorkeur systemen toe te passen, die enige veldhoek toestaan.

In dit verband moet – ondanks hun vrij grote populariteit – het gebruik van off-axis paraboloïden worden afgeraden. Zoals bekend levert een paraboloïde een perfecte afbeelding op de optische as, maar vertoont

zeer grote coma-aberratie zodra van die aspositie wordt afgeweken. De situatie wordt snel ongunstiger bij gebruik van een off-axis segment van een paraboloïde. De afwijking wordt nog gecompliceerder doordat het comatische faserfront met toenemende off-axis hoek van vorm verandert. Dit faserfront heeft spiegelsymmetrie ten opzichte van een vlak dat de optische as en de hoofdstraal (de as van de schuim in vallende bundel) bevat, maar heeft centraal-symmetrie ten opzichte van het snijpunt met de optische as. Deze component raakt meer ongebalanceerd naarmate wij ons off-axis bewegen. De component met spiegelsymmetrie overheerst daardoor en het werkzame deel van het faserfront nadert een cilindrische vorm. Hier begint de aberratie op astigmatisme te lijken met lijnvormige foci voor en achter het beste axiale beeld.

Het vaak teleurstellende resultaat, dat in de praktijk met off-axis paraboloïden bereikt wordt, is meestal te wijten aan (kleine) justagefouten. Dit is uiteraard reeds lange tijd bekend, evenals de remedie voor systemen met twee of meer spiegels. Daartoe behoren ook systemen die geheel uit sferische spiegels zijn opgebouwd [6], zie figuur 4.

Ondanks hun vrij grote populariteit moet het gebruik van off-axis paraboloïden worden afgeraden.

Optieken voor Nd-YAG-lasers

Materiaalaspecten

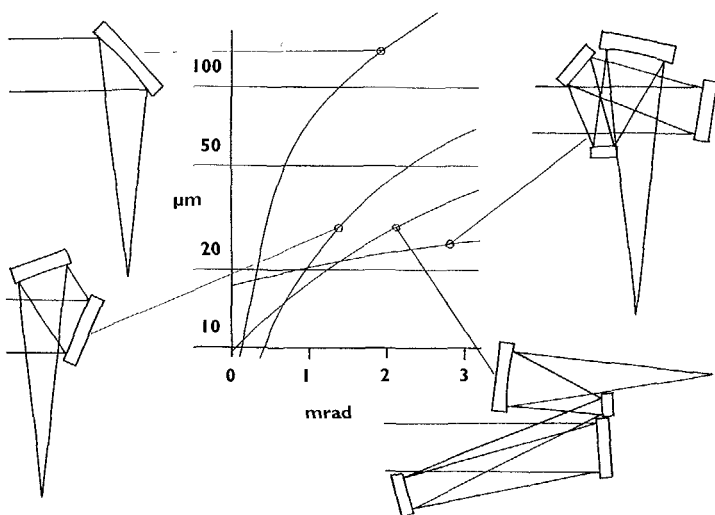
De golflengte van de straling van de Nd-YAG-laser ligt voldoende dicht bij die van zichtbaar licht, om gebruik te kunnen maken van het brede aanbod aan opusche glazen van hoge kwaliteit en lage kosten. Bij de zeer hoge piekvermogens die met Nd-YAG-lasers in Q-switch bedrijf kunnen optreden (meer dan $10^{11} \text{ W cm}^{-2}$), moet men echter rekening houden met het gevaar van inwendige beschadiging van het glas. Er zijn hiervoor twee mechanismen, een als gevolg van kleine insluitingen van absorberende partikels, zoals platina, die aan het fabricageproces te wijten zijn. Het tweede is het gevolg van zelf-focussing van laserstraling, die door toename van de brekingsindex bij hoge veldsterkte wordt veroorzaakt en met de niet-lineaire brekingsindex n_2 wordt omschreven. De kritische grens ten gevolge van insluitingen ligt veelal boven 10 J cm^{-2} . De niet-lineaire effecten, die sterk van het glastype afhangen, hebben pas na enige loopwég in het glas een schadelijke uitwerking, zodat het aanbeveling verdient, de optische componenten met dikker te maken dan echt noodzakelijk is.

Stralingstransport via optische vezels

Een van de meest in het oog springende ontwikkelingen van de afgelopen jaren is het snel toenemende gebruik van opusche vezels voor het transport van de straling van Nd-YAG-lasers naar de plaats van bewerking. Voor de gebruiker betekent dit een interface met een homogene bron met exact gedefinieerde afmeting – de diameter van de optische vezel – en stralenkegel. De numerieke apertuur aan de uitgang van de vezel. Bij lasers in het kW-gebied is de vezeluitgang door de fabrikant vaak reeds voorzien van een collimator. Dit heeft weliswaar enig verlies aan bundelkwaliteit (K) tot gevolg, maar de voordelen voor de applicatie overheersen doorgaans.

Enkele systeemaspecten

De hogere absorptiecoëfficiënt van metalen voor straling van de Nd-YAG-laser (in het golflengtegebied rond $1 \mu\text{m}$), vergeleken met die van de CO_2 -laser, maakt de Nd-YAG-laser aantrekkelijk voor het boren, (micro-)lassen en, in bepaalde gevallen, ook het snijden. Dit voordeel wordt nog versterkt door de talloze voor dit golflengtegebied beschikbare technieken voor



Figuur 4 Gevoeligheid van verschillende spiegelsystemen voor justagefouten. Het centrale deel van de figuur laat de geometrische aberraties (diameter van de zogenaamde 'blur-circle') zien als functie van de hoek met de systeem-as. De systemen aan de linkerzijde gebruiken paraboloïden onder 90° c.q. 40° graden, die aan de rechterzijde sferische spiegels (uit [1]).

manipulatie van de stralenbundel. Naast mechanische zijn er opto-elektrische methoden en componenten voor het afbuigen of multiplexen van de stralenbundels, al of niet in combinatie met optische vezels die (deel-) bundels naar de werkplek brengen voor onder meer simultane bewerkingen. De verklaring voor de spectaculaire groei van Nd-YAG-lasertoepassingen in het recente verleden zijn de optische en systeemvoordelen, samen met het beschikbaar komen van grotere vermogens.

Focusering van Nd-YAG-laserstraling

Optieken voor Nd-YAG-lasers profiteren van de beschikbaarheid van uiteenlopende optische glazen en de toepasbaarheid van volledig ontwikkelde ontwerpmethoden voor zichtbaar-licht optiek. Voor focuserende optiek, die meestal slechts binnen een kleine veldhoek toegepast wordt, volstaan bekende, weinig gecompliceerde ontwerpen.

Een punt van aandacht is het vermijden van foci binnen het lenzenstelsel ten gevolge van secundaire reflecties aan lensoppervlakken. Kitvlakken tussen de lenzen kunnen in deze lenzenstelsels beter worden vermeden, zeker bij hogere vermogens.

Laseroptieken zijn van oorsprong monochromatische systemen, die voor de golflengte van de desbetreffende laser geoptimaliseerd zijn. Bij sommige toepassingen kan een optisch systeem vereist zijn dat de bewerkende (Nd-YAG-) straling en die van een piloot-laser (veelal

een HeNe-laser met $\lambda = 632 \text{ nm}$), op precies dezelfde wijze afbeeldt. In dat geval zullen bij het optiekontwerp technieken voor kleurcorrectie toegepast worden. Als alternatief kunnen spiegelsystemen worden toegepast, zie figuur 5.

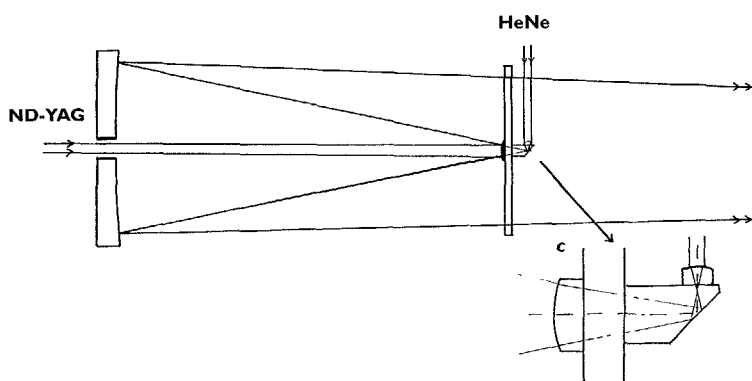
Nd-YAG-lasers worden ook veelvuldig toegepast voor het markeren, graveren en ritsen van groeven van uiteenlopende materialen, onder meer in de halfgeleiderindustrie. Het betreft in hoofdzaak lasers met kleine vermogens (minder dan 100 W), maar met een goede bundelkwaliteit. De eisen, die aan dergelijke systemen gesteld worden, zijn groeiende. Vooral ten aanzien van de snelheid, en bij het ritsen de kwaliteit van de groef, worden steeds hogere eisen gesteld. Waar in het verleden volstaan kon worden met eenvoudige scanners en dito optieken, zullen deze in de toekomst door geavanceerde optische systemen met een vlak beeldveld en telecentrische stralengang worden verdrongen. Analyses tonen aan dat de meerkosten van de optiek door een verhoogde productiviteit in korte tijd terugverdiend worden.

Optieken voor excimeerlasers

Er zijn enkele wezenlijke verschillen tussen het gebruik van een excimeerlaser in de materiaalbewerking en dat van de andere, hierboven vermelde, lasers.

- Het meest belangrijke verschil betreft de golflengte. Excimeerlasers stralen in het ultraviolet en leveren dus fotonen met een energie die in de orde van grootte van de bindingsenergie van (organische) moleculen ligt. De interactie tussen deze straling en de te bewerken materialen kan derhalve een niet-thermische zijn, de bindingen worden verbroken zonder dat opwarming tot hoge temperaturen voorafgaat. Dit opent nieuwe en unieke mogelijkheden.
- Verder maakt de korte golflengte een bewerking met hoge precisie tot in het sub-micrometer gebied mogelijk, en toepassingen van excimeerlasers zijn dan ook vooral in de microtechniek te verwachten.

Tegelijkertijd heeft de door een excimeerlaser opgewekte stralenbundel een matige tot slechte bundelkwaliteit ($K = 0,01$), gecombineerd met een, tengevolge van een zeer korte pulsduur, extreem hoog pickvermogen. Een dergelijke stralingsbron krijgt de voorkeur als verlichtingsbron van een 'masker' dat verkleind op een werkstuk wordt afgebeeld en zo in één keer de informatie op het werkstuk overbrengt. In tegenstelling tot de meeste toepassingen van CO_2 - en Nd-YAG-lasers



Figuur 5 Optisch systeem voor het focuseren van een gecollimeerde Nd-YAG-laserbundel van 1 kW tot een spot van 3 mm diameter, instelbaar tussen 8 en 12 meter afstand. De convexe spiegel C is voorzien van een hoogreflecterende coating voor Nd-YAG-laserstraling en voor goede transmissie van een HeNe-piloot-laser, die vanaf de zijkant wordt ingespiegeld. De grote spiegel heeft een diameter van 400 mm, en wordt axiaal verschoven voor focusering van beide laserbundels op de gewenste afstand.

Het systeem werd ingezet voor het onschadelijk maken van landmijnen door er, op een enigszins veilige afstand, een gat in te branden, waardoor de lading verbrandt zonder te exploderen (uit [1]).

betreft het geen puntbewerking, maar de bewerking van een gebied met eindige afmetingen. De bijbehorende optieken moeten daarop zijn afgestemd, zowel qua beeldveld als qua verlichtingsgeometrie. De optiek van een excimeerlaser-bewerkingssysteem is derhalve complex.

Materiaalaspecten

Het aantal voor lenzen bruikbare materialen daalt scherp zodra de golflengte onder 300 nm daalt. Synthetisch kwartsglas is het meest belangrijke materiaal. Daarnaast komen de kristallijne fluorides in aanmerking, vooral CaF_2 , LiF en, in mindere mate, MgF_2 , dat enige dubbelbreking vertoont. Alle genoemde materialen ondergaan onomkeerbare veranderingen bij bestraling met excimeerlasers als gevolg van de extreem hoge vermogensdichtheden die het gevolg zijn van de korte pulsduur. Het gevolg is een beperkte levensduur van deze optieken waartegen nog geen remedie gevonden is.

De (schaarse) materialen die geschikt zijn voor gebruik in het ultraviolette spectraalgebied hebben allen een relatief lage brekingsindex. Dit maakt het ontwerp van hoogwaardige optieken extra moeilijk. In de praktijk betekent dit dat voor een gesteld doel meer optische componenten nodig zijn. Daarentegen hebben deze materialen bij twee golflengtes wel nagenoeg identieke afbeeldingseigenschappen. Tevens zijn er duurzame anti-reflectie coatings ter beschikking.

Excimeerlasers stralen in het ultraviolet en leveren dus fotonen met een energie die in de orde van grootte van de bindingsenergie van (organische) moleculen ligt. Moleculaire bindingen kunnen verbroken worden zonder dat opwarming tot hoge temperaturen nodig is. Dit opent nieuwe en unieke mogelijkheden.

Afbeelding

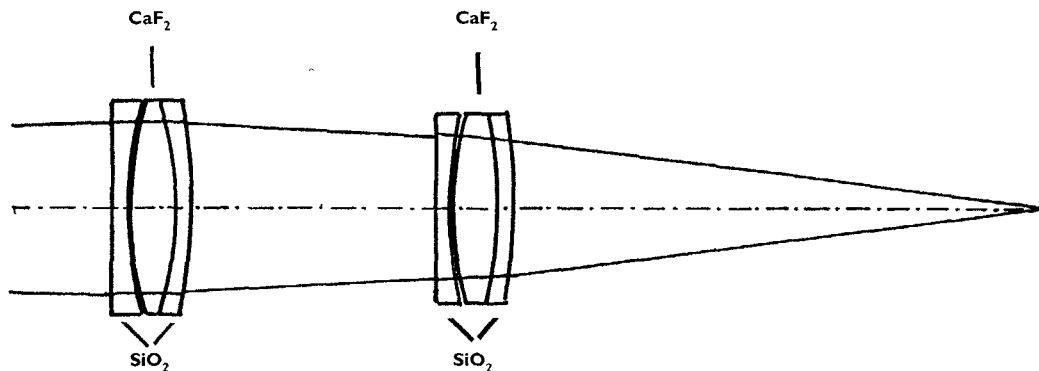
De stralenbundel van een excimeerlaser heeft over het algemeen een rechthoekige vorm met een lengte-breedte-verhouding van 2 à 3 en een bundelkwaliteit K nabij 0,01. Dientengevolge is de bundel minder geschikt voor puntbewerking dan als belichtingsbron van een op het werkstuk af te beelden masker. Dit betekent wel, dat slechts een kleine fractie van de – waardevolle en dure – energie van de excimeerlaser daadwerkelijk voor het beoogde proces wordt benut.

De kwaliteit van de bewerking wordt in hoge mate bepaald door de kwaliteit van de optiek, die het masker op het werkstuk afbeeldt. Deze optiek moet niet alleen de door buiging gestelde grenzen benaderen, maar dit tevens voor het gehele (eindige) beeldveld waar maken.

De eisen omtrent de numerieke apertuur komen voort uit de voor een bewerking benodigde energie-dichtheid (in J/cm^2), die afhangt van het te bewerken materiaal. Bewerkingen met een excimeerlaser geschieden pas boven een bepaalde drempelwaarde, die voor (organische) polymeren in het gebied van 0,1 tot 0,3 J/cm^2 , maar voor vele keramieken een grootteorde hoger ligt. Als de energiedichtheid wezenlijk hoger ligt, treedt verzadiging op. De procesparameters moeten dus zorgvuldig worden gekozen, wil de bewerking ook maar in de buurt van een optimum plaatsvinden.

Noodzaak van een grote werkafstand

'Ablatie' is het verwijderen van een oppervlaktelaag, waarbij de reactie van het verwijderde materiaal met de omgeving weinig voorspelbaar is. Om vervuiling van de optiek voorkomen, moet een zo groot mogelijke afstand tussen de optiek en het werkstuk worden aangehouden. Deze eis bemoeilijkt het ontwerpen van deze optieken meer dan alle andere eisen, zie figuur 6.



Figuur 6 Voorbeeld van een voor twee golflengtes gecorrigeerde, aberratievrije optiek voor 10 l verkleinende afbeelding van een masker voor de bewerking met een excimeerlaser ($\text{ArF}_1 = 193 \text{ nm}$), met een brandpuntsafstand van 83 mm bij $f/4$. De straling van een HeNe-laser dient voor het focuseren en wordt in precies hetzelfde beeldvlak afgebeeld. Het systeem heeft een beeldveld van 3 mm en wordt gebruikt voor precisiewerkingen (uit [1]).

Fotolithografie

Fotolithografie is een sleuteltechnologie bij de fabricage van 'chips'. Hoog-geïntegreerde halfgeleiderschakelingen worden door belichting van een masker met behulp van ultraviolette straling op een fotogevoelige laag, de zogenaamde 'fotoresist' die op de siliciumplak zit, overgebracht. In toenemende mate worden hiervoor excimeerlasers gebruikt.

Aangezien hier geen materiaal wordt verwijderd, is een grote werkafstand voor de optiek niet nodig. Aan de optiek voor fotolithografie worden echter zeer hoge eisen gesteld ten aanzien van numerieke apertuur, veldgrootte en tevens vlakheid van dit veld. Daardoor vormen optieken voor fotolithografie een heel aparte klasse, die zestien en meer optische componenten bevatten, meer dan \$ 100 000 kosten, met een stijgende tendens.

Bundelhomogenisatie

De rol van een excimeerlaser is voornamelijk die van verlichtingsbron van een op het werkstuk af te beelden masker. Mede vanwege de niet-lineariteit van het ablatieproces worden hoge eisen aan de homogeniteit van die verlichting gesteld. De ruwe bundel van een excimeerlaser heeft meestal een rechthoekige vorm met een – vooral in de smalle richting – Gauss-achtig verlopen intensiteit. Deze ruwe bundel is niet voldoende homogeen om rechtstreeks als belichtingsbron te fungeren. Ter homogenisatie in het verlichtingsvlak van het masker worden optieken toegepast die de oorspronkelijk bundel in deelbundels splitsen en over elkaar heen leggen voor middeling. De optredende interferentie-effecten zijn voldoende klein en niet storend als gevolg van de korte golflengte.

Conclusies

Het ontwerpen van optieken voor gebruik met hoogvermogen lasers is in vele opzichten vergelijkbaar met dat voor andere optische toepassingen. De bijzondere eigenschappen van de (coherente) laserstraling, de hoge vermogens en de vermogensdichtheden en de beperkingen in de eigenschappen van het lensmateriaal zijn niet te verwaarlozen aspecten. Deze aspecten moeten goed zijn begrepen wil men de enorme kennis, die in de loop van eeuwen op het gebied van de optiek is opgebouwd, met goed resultaat naar het gebied van hoogvermogenlasers kunnen overbrengen. Vanuit mijn eigen ervaring meen ik te mogen stellen

dat de rol en het potentieel van de optiek in toepassingen van hoogvermogen lasers lang met volledig benut en ook onvoldoende onderkend wordt.

Een nauwere samenwerking tussen optici en lasergebruikers is zeker wenselijk.

Literatuur

[1] L.H.J.F. Beckmann, D. Ehrlichmann, *Optical systems for high-power laser applications principles and design aspects*, *Opt and Quant Electronics* 27,(1995)p 1407-1425

[2] L.H.J.F. Beckmann, J.L.F. De Meijere, *Retrofocus optics for the focussing of CO₂-laser radiation a comparison between designs using spherical optics and aspherics*, *High Power CO₂ Laser Systems and Applications*, SPIE vol 1020(1988)p 192-195

[3] L.H.J.F. Beckmann, O. Marten, *Zoom lens designs for use in sheet metal cutting by high power CO₂-lasers*, *Lens and Optical Systems Design*, Berlin, 14-18 Sept, 1992, SPIE vol 1780(1993)p 765-776

[4] R.J. Tangelder, L.H.J.F. Beckmann, J. Meijer, *Influence of temperature gradients on the performance of ZnSe-lenses*, *Lens and Optical Systems Design*, Berlin, 14-18 Sept, 1992, SPIE vol 1780 (1993)p 294-302

[5] L.H.J.F. Beckmann, *Modelling of, and design for, thermal radial gradients in lenses for use with high power laser radiation*, *OSA Proceedings of the Int. Optical Design Conf. Rochester, NY*, June 6-9 1994, G.W. Forbes, editor, p 11-15

[6] L.H.J.F. Beckmann, D. Ehrlichmann, *Three-mirror off-axis systems for laser applications*, *OSA Proceedings of the Int. Optical Design Conf. Rochester, NY*, June 6-9 1994, G.W. Forbes, editor, p 340-348

[7] A.E. Siegman, *Analysis of laser beam quality degradation caused by quartic phase aberrations*, *Appl Opt* 32(1993)p 5893-5901

Noot

Voordracht ter gelegenheid van de Techno Dag 'Laser, het onmisbare gereedschap', georganiseerd door Techno Bridge, Rotterdam 30-5-96 door Prof. Dr. Leo H.J.F. Beckmann, Universiteit Twente, E-mail Beckmann@wb.utwente.nl

Foto's

Haas Laser, Schramberg (Duisland)