

Mogelijkheden voor het gebruik van lasers voor militaire toepassingen

ir. T. Bakker

Fysisch Laboratorium TNO, Den Haag

In 1960 zijn de eerste LASERS gerealiseerd (Maiman, Javan) door de principes van de MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) toe te passen bij de zeer hoge frequenties, waarmee het licht (L: Light) trilt.

Sindsdien is in de laboratoria een reeks uitvoeringen van LASERS geconstrueerd. De golflengte van de uitgezonden straling varieert daarbij van het ultraviolet ($\lambda \sim 0,15 \mu\text{m}$) tot het verre infrarood ($\lambda \sim 300 \mu\text{m}$). Technieken voor het pulsen, verstemmen, stabiliseren en detecteren van de straling van de verschillende lasers zijn ontwikkeld. Niet-lineaire optische verschijnselen, zoals het mengen van de straling van twee lasers met een verschillende golflengte, het opwekken van straling met de dubbele frequentie enz., zijn bestudeerd.

De aanvankelijk hoog gespannen verwachtingen m.b.t. de toepassing van lasers hebben toch nog geruime tijd op hun vervulling laten wachten. De laatste jaren echter wordt de introductie van lasers in civiele en militaire toepassingen steeds frequenter.

In het tijdschrift Aviation Week & Space Technology worden regelmatig geavanceerde wapensystemen vermeld, waarin lasers worden toegepast. De opmerking van de Amerikaanse generaal, dat „... the laser is a solution, looking for a problem”, is dus inmiddels ruimschoots achterhaald.

In dit artikel wordt eerst het principe van de laser kort toegelicht en worden de fundamentele eigenschappen van laserstraling beschreven. Na een korte beschrijving van enkele uitvoeringsvormen worden de toepassingsmogelijkheden voor militaire doeleinden aangegeven.

1. Principe van de werking van de laser

In dit artikel wordt niet ingegaan op de fundamentele theorie van de laser. De werking wordt toegelicht aan de hand van een analogon met een elektronische oscillator.

Het is bekend, dat de intensiteit van de straling, die invalt op een bepaalde stof, afneemt naarmate de doorlopen afstand in die stof groter wordt. Een gedeelte van de invallende straling wordt in de stof geabsorbeerd. Dit verschijnsel is karakteristiek voor stoffen, die zich, zoals in het dagelijks gebruik, in thermisch evenwicht met de omgeving bevinden.

Om de invallende straling te versterken is het noodzakelijk dit thermisch evenwicht te verbreken. Men dient het lasermateriaal te activeren; men noemt dit activeringsproces het *pompen*. Er zijn verschillende technieken (pompmethodes) om het lasermateriaal te activeren:

a. door een *gasontlading* door een geschikt gasmengsel te sturen:

— de helium-neon-gaslaser; $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$;

— de kooldioxyde-gaslaser; $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$;

b. door *bestraling* met een intense lichtbron van een geschikt kristal of een geschikte vloeistof met een specifieke toevoeging van bepaalde atomen:

— robijnkristal; dit is een aluminiumoxydekristal met een doping van 0,05% chroomatomen; $\lambda = 0,69 \mu\text{m}$;

— yttrium-aluminiumgranaat (YAG)-kristallen met enkele procenten neodymiumatomen; $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$;

— kleurstoffen in geschikte oplosmiddelen (bv. Rhodamine 6G in ethanol); $\lambda \sim 0,6 \mu\text{m}$;

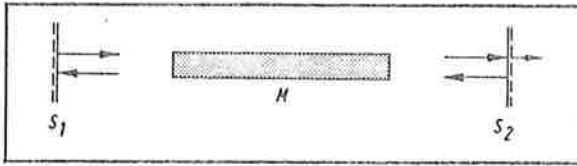
c. door een sterke *stroompuls* door de sperlaag van een halfgeleiderdiode te sturen:

— de galliumarsenide-diodelaser; $\lambda \sim 0,9 \mu\text{m}$;

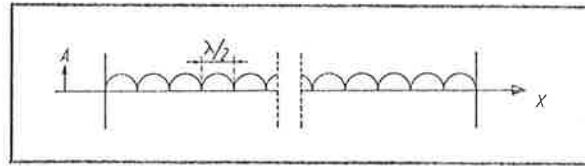
d. tijdens bepaalde *chemische reacties* worden componenten in een voor laserwerking gunstige, geëxciteerde toestand gevormd:

— de fluorwaterstoflaser ($\text{F} + \text{HCl} \rightarrow \text{HF} + \text{Cl}$); $\lambda = 2,5 - 3,0 \mu\text{m}$.

Het geactiveerde lasermateriaal fungeert als een versterker voor elektromagnetische trillingen met lichtfrequenties. Kenmerkend voor de laserwer-

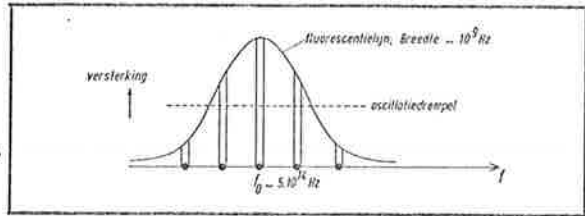


Afb. 1 Principe van de laser
 S_1 hoogreflecterende reflector, S_2 uitkoppelspiegel,
 M lasermedium.



Afb. 2 Amplitudeverdeling langs de resonatoras

Afb. 3 Frequentiespectrum van een helium-neon-gaslaser; op de frequenties zijn de resonantiefrequenties van de resonator gemarkeerd



king is, dat bij dit versterkingsproces de fase van de lichttrillingen behouden blijft. Laat men dus op een optische homogene en geactiveerde cilinder lasermateriaal met vlak gepolijste eindvlakken een vlakke golf langs de as invallen, dan komt deze er, na het materiaal te hebben doorlopen, als een versterkte vlakke golf uit (afb. 1). Men maakt hiervan een oscillator door een gedeelte β van de versterkte trilling weer in fase naar de ingang terug te koppelen. Bij een laser is deze terugkoppeling eenvoudig te realiseren door het materiaal bv. tussen twee evenwijdige, loodrecht op de as staande, reflectors op te nemen. De oscillatievoorwaarde luidt: $\beta V = 1$, als V de netto versterking voor een complete rondgang voorstelt. Door één van de spiegels S_2 een bepaalde doorlaatbaarheid te geven, kan men de opgewekte laserstraling uitkoppelen.

Men kan berekenen, dat voor een dergelijke configuratie van twee evenwijdige, op afstand geplaatste, reflectors (resonator van Fabry en Perot) alleen voor bepaalde ruimtelijke patronen (modes) van het stralingsveld binnen de resonator de verliezen gering zijn. In een vereenvoudigde voorstelling kan men de veldverdeling met de laagste verliezen opgebouwd denken uit in de asrichting heen en weer lopende vlakke golven. Het blijkt dan, dat het resulterende elektrische veld op de uitkoppelspiegel nagenoeg met een gelijke fase trilt.

Een zeer intens veld bouwt zich op in de resonator, wanneer de optische afstand tussen de reflectors gelijk is aan een geheel aantal halve golflengtes (resonantieconditie; zie afb. 2). Door de geringe verliezen en het grote aantal golflengtes, dat op de resonatorlengte kan worden aangepast, heeft de resonator een grote frequentieselectiviteit. Bij een kleine variatie in de golflengte „past” het veld niet meer in de resonator.

In afb. 3 is het frequentiespectrum van een he-

lium-neon-gaslaser geschetst. De combinatie van de breedte van de spectrale overgang en de selectiviteit van de laserresonator maakt, dat slechts een beperkt aantal frequenties mogelijk is. Laserstraling is dus erg monochromatisch. Opgemerkt wordt, dat in dit geval niet het atoom, doch de resonator bepaalt welke frequenties uiteindelijk worden uitgezonden.

2. Eigenschappen van de laserstraling

In tegenstelling met de straling afkomstig van een gloei- of een fluorescentiebuislamp, vertonen de door een laser opgewekte elektromagnetische trillingen een zekere samenhang. Men spreekt van coherentie en onderscheidt als volgt.

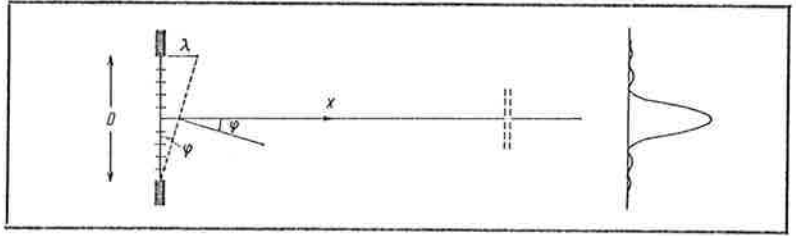
— *Plaatscoherente eigenschappen.* Hieronder wordt de eigenschap verstaan, dat in een punt van de ruimte de fase van de lichttrillingen een vast verband heeft met die in naburige punten.

— *Tijdcoherentie.* Men verstaat hieronder de eigenschap, dat in een punt van de ruimte de amplitude en fase van de elektromagnetische trilling op een bepaald moment een vast verband hebben met die op een tijdsverschil, eerder of later gemeten. Het tijdbestek, waarover dit verband geldt noemt men de *coherentietijd*.

De mogelijke toepassingen van de laser hangen nauw met deze bijzondere fysische eigenschappen samen. De direct waarneembare gevolgen zijn:

1. de uitgezonden straling wordt binnen een zeer kleine openingshoek (eenheid: 1 milliradiaal) uitgezonden. De bijdragen van afzonderlijke gebiedjes binnen de apertuur D tellen alleen op in een richting loodrecht op de opening, omdat dan de optische weglengte voor alle elementjes dezelfde is en dus alle bijdragen dezelfde fase hebben

Afb. 4 Bundelspreiding van een laser; de opening D is gelijk gedacht aan de diameter van de lichtvlek op de uitkoppelspiegel



(afb. 4). Het eerste nulpunt ligt in de richting $\text{tg } \varphi (\sim \varphi) = \lambda/D$. Voor ieder elementje in de bovenste helft van de opening is er dan een elementje in de onderste helft met tegengestelde fase. Het verband $\varphi \sim \lambda/D$ is analoog aan dat voor een antenne voor radio- en radargolven. Bij een laser is de antennediameter zeer groot t.o.v. de golflengte; vandaar de kleine bundelspreiding; 2. de tijdcoherentie-eigenschap heeft tot gevolg, dat het toelaatbare wegverschil bij interferometrische experimenten veel groter is dan bij gebruik van conventionele lichtbronnen (afb. 5). Het invallende licht L wordt door een deelspiegel B in twee gedeelten gesplitst. Na reflectie aan de spiegels S_1 resp. S_2 worden de bundels bij O weer verenigd. Wanneer het weglengteverschil gelijk is aan een oneven aantal malen $\lambda/2$, doven de bundels elkaar uit. Bij een weglengteverschil gelijk aan een even aantal malen $\lambda/2$ wordt de resulterende intensiteit groter.

De coherentie-eigenschappen verschillen voor de diverse typen lasers. Gaslasers hebben meestal goede plaats- en tijdcoherentie-eigenschappen. Bij vaste-stoflasers zijn de tijdcoherentie-eigenschappen meestal niet zo goed.

3. Uitvoeringsvormen en algemene toepassingen van lasers

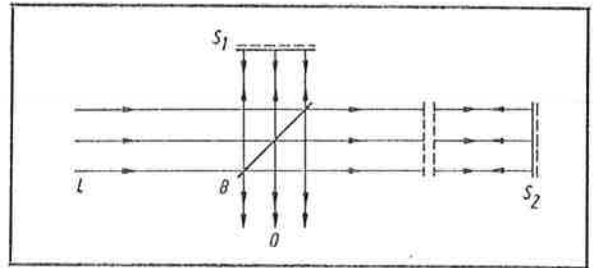
Er zijn uitvoeringsvormen van lasers waarbij de straling continu wordt uitgezonden. Bij andere typen wordt de straling in pulsen geëmitteerd. De voornaamste eigenschappen en toepassingsmogelijkheden worden hieronder vermeld.

3.1. De gaslasers

De volgende typen zijn het meest geschikt.

3.1.1. DE HELIUM-NEON-GASLASER

Deze laser (golflengte $\lambda = 0,63 \mu\text{m}$, afgegeven vermogen 0,5 - 50 mW) wordt voornamelijk gebruikt voor optische precisemetingen (interferometrie) en als uitrichtmiddel in één en twee dimensies. De helium-neonlaser wordt als coherente



Afb. 5 Interferometer van Michelson. Het invallende laserlicht L wordt door de deelspiegel B in twee bundels van ongeveer gelijke intensiteit gesplitst. De ene bundel wordt gereflecteerd aan B en vervolgens door de hoogreflecterende spiegel S_1 in de richting van O teruggekaatst; de andere bundel wordt door B doorgelaten en na reflectie aan de hoogreflecterende spiegel S_2 via B ook in de richting van O teruggekaatst

lichtbron gebruikt in de holografie, bij het bewerken van beelden en geregistreerde signalen en bij de opslag van informatie (zie § 4.12).

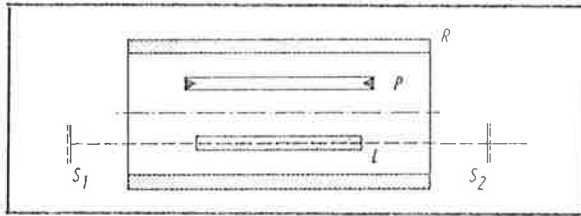
3.1.2. DE KOOLDIOXYDELASER

Voor de normale uitvoering is het continu afgegeven vermogen ca. 100 W bij een golflengte van $10,6 \mu\text{m}$. Deze laser wordt toegepast voor de bewerking van materialen. Omdat de transmissie-eigenschappen van de atmosfeer bij deze golflengte gunstig zijn is deze laser geschikt voor communicatiedoelinden.

In een bijzondere, zg. gasdynamische, uitvoering [1] van de kooldioxydelaser is het gelukt zeer grote vermogens (10 - 100 kW) gedurende langere tijd (eenheid 1 sec) op te wekken.

Ook met behulp van chemische reacties is het gelukt CO_2 -lasers te construeren. Uit de schaarse gegevens, die uit publikaties bekend zijn, valt op te maken dat volgens deze methode zeer grote vermogens kunnen worden gegenereerd.

Een andere nieuwe ontwikkeling is de toepassing van een gasontlading in kooldioxyde bij hoge druk (TEA-laser: Transverse Excited at Atmospheric pressure). Op deze wijze zijn gepulste kooldioxydelasers met piekvermogens van 1 - 100 MW geconstrueerd [1].



Afb. 6 Opbouw van een vaste-stoflaser
 P pomp lichtbron, L laserstaaf, R cilindervormige reflector, S₁ hoogreflecterende spiegel, S₂ uitkoppelspiegel

3.1.3. DE GASIONENLASER

Door zeer sterke ontladingsstromen door geschikte gassen (Argon, Krypton) te sturen is het mogelijk laserwerking te verkrijgen in een toestand, waarin het lasergas is geïoniseerd. Op een aantal golflengtes van het zichtbare spectrum is laserwerking mogelijk.

Hoewel het afgegeven continue vermogen redelijk groot is (~ 10 W), zijn het nodige pompvermogen (10 kW) en de vereiste waterkoeling onaantrekkelijke aspecten voor toepassing van dit type lasers buiten het laboratorium.

3.2. Vaste-stoflasers

In afb. 6 is de opbouw van een vaste-stoflaser geschetst. Het licht van de pomplamp wordt door een reflector in het laserkristal geconcentreerd. Wanneer de pompenergie groter is dan een bepaalde drempelwaarde treedt laserwerking op. Voor continue lasers is een continue pomplamp nodig. Zowel de lamp als het kristal dienen dan te worden gekoeld. Bij toepassing van een met neodymium gedoopt kristal van yttrium-aluminiumgranaat (YAG) is het afgegeven continuvermogen 10 - 100 W bij een pompvermogen van 1 - 3 kW.

Voor een gepulste laser wordt veelal een flitsbuis als pompbron gebruikt. Een speciale techniek is ontwikkeld voor het verkrijgen van korte steile en zeer intense pulsen, bv. voor toepassing in afstandmeters. Tijdens het ontsteken en branden van de

flitsbuis onderdrukt men de terugkoppeling in de resonator, bv. door één van de spiegels schuin op de as te plaatsen. Wanneer het materiaal maximaal is geactiveerd (d.i. meestal aan het einde van de pomppuls) herstelt men de terugkoppeling zéér snel. Alle energie, die in het materiaal is opgeslagen, komt dan in één enkele, zéér intense puls vrij. De piekvermogens, die op deze wijze zijn opgewekt bedragen 1 - 10.000 MW bij pulsduren, die liggen tussen 1 en 10 nsec (het hoogste, bereikte piekvermogen is 10^{13} W). In een praktische uitvoering past men als zg. Q-switch een elektrooptische sluitertoe, of één van de eindreflectors van de resonator wordt roterend uitgevoerd. In afb. 7 is de gedaante van de puls van een neodymium-glaslaser met een roterende reflector gegeven.

Door een geschikte sluitertoe te nemen in de resonator van een continue vaste-stoflaser is het mogelijk pulsen met een hogere repetitiefrequentie (10 kHz) op te wekken, bv. voor toepassing in radar, lijnscanners enz. In tabel 1 zijn de typische gegevens van neodymiumlasers samengevat.

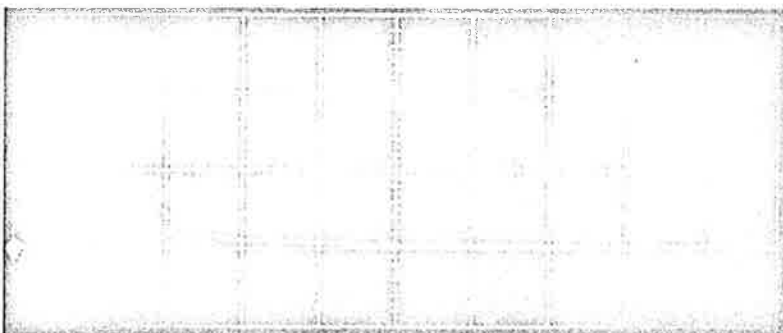
Een interessante vaste-stoflaser is die waarbij met erbium gedoopt glas of YAG wordt toegepast. Bij de golflengte van de erbiumlaser ($\lambda \sim 1,56 \mu\text{m}$) is er nl. door de zeer geringe transmissie van de oogbol geen gevaar voor netvliesbeschadigingen.

3.3. Kleurstoflasers

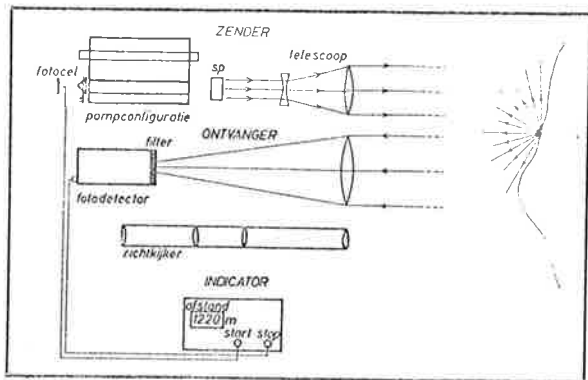
Bepaalde kleurstoffen kunnen in een geschikt oplosmiddel tot „laseren” worden gebracht door ze met een korte intense lichtflits te bestralen [1].

TABEL 1

Materiaal	Rep.-freq.	Pulsduur	Piekvermogen
Neodymium in glas	1 Hz	10 nsec	1 — 1000 MW
Neodymium in YAG	20 Hz	10 nsec	1 — 100 MW
Neodymium in YAG	10 kHz	100 nsec	1 — 10 kW
Neodymium in glas	1 p. min.	1 nsec	10^3 — 10^7 MW
Neodymium in YAG	continu		1 — 1000 W continu



Afb. 7 Gedaante van de puls van een neodymiumlaser met roterend 90° dakkantprisma (draaisnelheid prisma: 24.000 omw/min); horizontaal: 50 nsec/eenheid, verticaal: 2 MW/eenheid



Afb. 8 Principe van de laserafstandmeter

Veelal wordt een andere laser als pompbron gebruikt. De pulsduren zijn van de orde van 0,1 - 1 μ sec. De piekvermogens bedragen 10 - 100 kW. Het aantrekkelijke van de kleurstoflaser is, dat de golflengte van de uitgezonden straling over een beperkt gebied kan worden afgestemd (voorbeeld: Rhodamine 6-G in ethanol; $\lambda = 0,57 - 0,61 \mu\text{m}$, piekvermogen 10 - 100 kW).

De laatste ontwikkeling op het gebied van de kleurstoflaser vormt de zg. *exciplex*laser. Deze kan over een groter golflengtegebied worden verstemd (voorbeeld 4-Methylumbelliferone; $\lambda = 0,39 - 0,56 \mu\text{m}$).

3.4. Diodelasers

Het meest toegepaste materiaal voor diodelasers is galliumarsenide. De golflengte λ van de uitgezonden straling is afhankelijk van de temperatuur. Bij 300°K is $\lambda \sim 900 \text{ nm}$; bij 77°K is $\lambda \sim 850 \text{ nm}$. Door serie- en parallelschakeling van een groot aantal diodes in een zg. diode-array kan het vermogen van de uitgezonden straling worden opgevoerd. Bij 77°K is het *gemiddeld* uitgezonden vermogen 1 - 30 W bij een duty-cycle van 2% (10.000 Hz-pulsen met een pulsduur van 2 μ sec). Het rendement is dan $\sim 20\%$.

Belangrijk is de ontwikkeling van diodes van gallium-aluminiumarsenide. Hiermee zijn bij kamertemperatuur ongeveer dezelfde eigenschappen gerealiseerd als met galliumarsenide-diodelasers bij 77°K.

3.5. Niet-lineaire optische verschijnselen

De veldsterktes, die optreden bij de wisselwerking tussen laserstraling en materialen kunnen zo groot worden, dat ze niet meer kunnen worden verwaarloosd ten opzichte van de veldsterkte die in het atoom heerst. De stof begint zich dan merkbaar niet-lineair te gedragen. Laat men de straling, af-

komstig van een neodymiumlaser ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$), onder een geschikte hoek met de kristallografische asrichtingen op een kristal van ADP (ammoniumdihydrofosfaat) invallen, dan wordt straling met een golflengte van 0,53 μm (de zg. groene laserstraal) opgewekt.

Door laserstraling met verschillende golflengtes op een gedefinieerde manier in een stof met optisch niet-lineaire eigenschappen te laten invallen kan straling met de som- of verschilfrequentie worden opgewekt.

Resumerend kan worden gesteld dat op een zeer groot aantal golflengtes tussen 0,3 en 300 μm laserstraling kan worden gegenereerd.

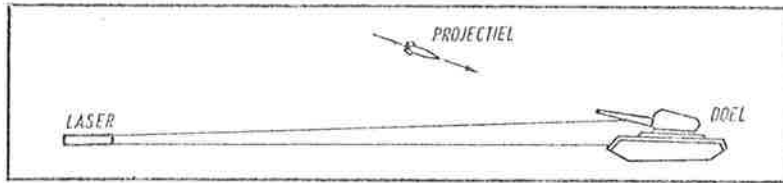
4. Toepassingen van lasers [2]

4.1. De laserafstandmeter (afb. 8)

Een korte, steile stralingspuls wordt door een gepulste vaste-stoflaser in de richting van het doel uitgezonden. De reeds kleine bundelspreiding wordt door de in de omgekeerde richting werkende telescoop nog meer verkleind. Een klein gedeelte van de door het doel in alle richtingen verstrooide straling wordt opgevangen in de ontvanglens. Een in het brandvlak geplaatste detector levert een signaal voor het stoppen van een elektronische teller. Het tijdsverschil met het startsignaal, op het moment dat de laserpuls wordt uitgezonden, wordt gemeten. Uit de bekende lichtsnelheid ($\sim 300 \text{ m}/\mu\text{sec}$) volgt de afstand tot het doel. Met een dergelijke afstandmeter is het mogelijk afstanden tot vlak naast elkaar gelegen doelen afzonderlijk en nauwkeurig te meten (minimale onnauwkeurigheid $\sim 15 \text{ cm}$).

Het is ook mogelijk met gepulste diodelasers afstanden te meten. De bundelspreiding is dan echter groter en het bereik en de nauwkeurigheid zijn minder groot dan bij gebruik van de gepulste vaste-stoflaser.

Een methode om zeer nauwkeurig afstanden te meten is die met behulp van een gemoduleerde continue laser. De eigenlijke meting berust op de vergelijking van de fase van de modulatie van de uitgezonden bundel met die van de ontvangen bundel. Door de modulatie op verscheidene frequenties uit te voeren is een nauwkeurige en onduubdelzinnige afstandmeting mogelijk. Voor diffuus reflecterende doelen is het bereik kleiner dan bij gebruik van een gepulste laser. Voor civiele doeleinden worden op het doel hoekreflectors aangebracht. Deze hebben de eigenschap de



Afb. 9 Doelaanwijzing met behulp van lasers

opgevangen straling in dezelfde richting te reflecteren. Hierdoor wordt het ontvangen signaal aanzienlijk vergroot. Nauwkeurigheden van 1 mm over afstanden van ~ 5 km zijn volgens deze methode mogelijk.

De gepulste laserafstandmeter wordt toegepast voor de vuurleiding van tanks en veldartillerie.

Afstandmeters met behulp van een gemoduleerde continue laser worden toegepast voor de continue hoogtemeting uit laagvliegende vliegtuigen en in de landmeetkunde.

4.2. Doelaanwijzing met behulp van lasers (afb. 9)

De uitgezonden bundel van een gepulste of gemoduleerde laserbundel wordt op het te treffen doel gericht. Het af te leveren projectiel, bv. een vliegtuigbom of een geleid projectiel, is uitgerust met een besturingsmechanisme. De kop van het projectiel is voorzien van een ontvanger die gevoelig is voor de laserstraling waarmee het doel wordt „belicht”. De ontvanger bevat een elektro-optische sensor, die het besturingsmechanisme zodanig regelt, dat het projectiel naar het doel wordt geleid. De trefzekerheid is zeer groot. Uit de open literatuur is bekend dat dergelijke systemen reeds in gebruik zijn [3].

4.3. Toepassingen in nachtzienapparatuur

4.3.1. GATED VIEWING (afb. 10)

Bij de toepassing van helderheidsversterkers is een minimale verlichtingssterkte van het tafereel vereist. Op maanloze, bewolkte nachten wordt dit minimale lichtniveau (10^{-3} lux) niet bereikt. Een kunstmatige lichtbron is dan vereist. Gebruikt men hiervoor een continue lichtbron, dan wordt men volledig overstraald door de terugverstrooiing van het licht in de atmosfeer vlakbij de ontvanger. De oplossing is de toepassing van een gepulste

lichtbron en een gepulste helderheidsversterker. De helderheidsversterker wordt pas een bepaalde tijd Δt na het uitzenden van de lichtpuls gedurende een korte tijd δt opengeschakeld. Door Δt te variëren „doorloopt” men als het ware het tafereel successievelijk in de diepte.

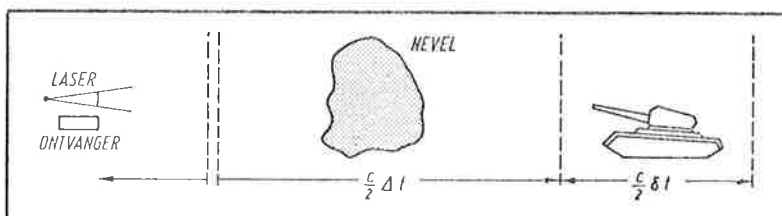
De gated-viewingconceptie heeft een aantal potentiële mogelijkheden.

a. Bij het passieve gebruik van helderheidsversterkers treedt een aanzienlijk contrastverlies op omdat het licht, dat invalt op de atmosfeer die zich tussen doel en waarnemer bevindt, wordt verstrooid in de richting van de waarnemer. Bij een gated-viewingsysteem staat de ontvanger slechts gedurende hooguit 2% van de totale tijd open. De hoeveelheid ontvangen en verstrooid hemellicht wordt zodoende met een factor 50 gereduceerd, waardoor het contrastverlies aanzienlijk wordt verminderd.

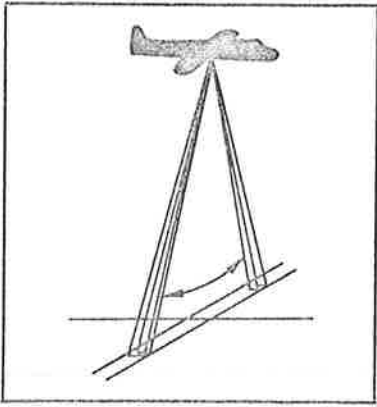
b. Het contrastverlies dat optreedt bij gebruik van rookgordijnen, kan worden verminderd door de helderheidsversterkerbuis pas open te schakelen na een tijd Δt_0 , corresponderend met de afstand van de waarnemer tot juist voorbij het rookgordijn v.v. Tot op zekere hoogte is het dus mogelijk door het rookgordijn heen te zien.

c. Door de helderheidsversterker pas te openen na een tijd Δt_1 , corresponderend met afstanden die *groter* zijn dan de afstand waarnemer-doel v.v. ziet men het doel in silhouet tegen een verlichte achtergrond. Dit kan aanleiding geven tot een aanzienlijke contrastvergroting.

d. Door de vertragingstijd Δt te variëren kan men de afstand tussen waarnemer en doel meten. Er is dan geen gevaar voor valse echo's, omdat men op het scherm waarneemt van welk doel de afstand wordt gemeten.



Afb. 10 Gated viewing
 Δt vertragingstijd tussen zenden en ontvangst; δt tijdsinterval, waarbinnen de ontvanger openstaat



Afb. 11 Laser-lijns scanner

Als verlichtingsbron gebruikt men gepulste diodelasers, gemonteerd in „arrays”. Vooral wanneer de gallium-aluminiumarsenide-diodelasers commercieel beschikbaar komen (die bij kamertemperatuur werken) ontstaat een vrij eenvoudig waarnemingsinstrument met interessante toepassingsmogelijkheden. Behalve in het veld worden gated-viewingtechnieken ook uit vliegtuigen en helikopters toegepast. Voor gebruik onder water wordt als lichtbron een gepulste neodymiumlaser met verdubbelde frequentie toegepast.

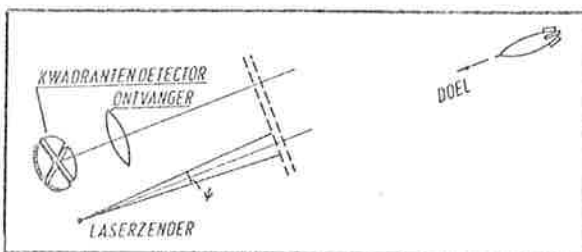
4.3.2. LASER-LIJNSCANNERS (afb. 11)

In analogie met passieve infrarood-lijnscaanapparatuur zijn laser-lijnscaanners ontwikkeld. Ze zijn vooral bedoeld om 's nachts uit een vliegtuig verkenningen te verrichten.

De laserbundel wordt met behulp van een roterend optisch systeem langs een strook grond onder het vliegtuig „gesweept”. Synchroon met de laserbundel wordt het gezichtsveld van een ontvanger bewogen. Het ontvangen signaal wordt met behulp van een display omgezet in een afbeelding van het tafereel. Het scheidend vermogen, dat op deze wijze kan worden bereikt is groot (orde van grootte: $\sim 0,5$ milliradiaal).

Het is mogelijk verscheidene lasers met verschillende golflengtes in het zichtbare en het infrarode

Afb. 12 Principe van een mogelijke uitvoering van een laser-volgsysteem



gebied simultaan toe te passen. Tegen een dergelijke waarneming is camouflage uiterst moeilijk.

Ook zijn er speciale uitvoeringen waarbij tegelijkertijd hoogteverschillen in het terrein worden gemeten.

4.4. Radarsystemen met behulp van lasers

Door een laserbundel over een bepaalde ruimtehoek te scannen en de in de tijd terugkomende signalen synchroon op een display weer te geven, verkrijgt men een laserradar. Zowel uitvoeringen met een gepulste laser als met een gemoduleerde continue laser (puls-compressiesystemen) zijn mogelijk [4].

Door de geringe bundelbreedte is het mogelijk een zeer gedetailleerd beeld van het tafereel op te bouwen. De zoekcapaciteit van zo'n laserradar is echter door de geringe bundelbreedte erg klein. De afstand tot een eventueel aanwezig doel kan zeer nauwkeurig worden bepaald. De afhankelijkheid van de atmosferische transmissie is groter dan bij een conventionele radar. Het bereik van een laserradar is veel kleiner (maximaal ~ 10 km).

Een dergelijke laserradar zal dus meestal parallel aan een conventionele radar of een ander zoekstelsel (bv. thermisch infrarood) opereren.

4.5. Volgsystemen met behulp van lasers (afb. 12)

Met een laserradarsysteem wordt een bepaalde ruimtehoek ψ afgezocht. Een optische ontvanger met een gezichtsveld ψ ontvangt een signaal op een tijdstip, dat overeenkomt met het moment waarop de laserbundel het doel treft. De plaats van het doel binnen het gezichtsveld kan worden bepaald door de detector onder te verdelen. In een eenvoudig geval wordt bv. een zg. kwadrantendetector toegepast. De stuursignalen, die aan het servosysteem worden toegevoerd zijn zodanig, dat het midden van het gezichtsveld wordt samengebracht met de richting waarin het doel zich bevindt. De coördinaten van het doel zijn dan in azimut, elevatie en afstand nauwkeurig bekend. De stoor gevoeligheid van een dergelijk systeem voor tegenmaatregelen is door de geringe bundelbreedte en de geringe meettijd erg klein. Het bereik is echter beperkt (maximaal ~ 10 km).

Voor het volgen en geleiden van afgeschoten projectielen kan het bereik aanzienlijk worden vergroot door het aan de achterzijde van het projectiel inbouwen van hoekreflectors. Dergelijke systemen worden toegepast voor de geleiding van raketten naar het interceptiepoint met het doel.

Volgsystemen kunnen zowel met gepulste lasers, als met gemoduleerde continue lasers worden gerealiseerd [4].

4.6. Dopplerradar: coherente detectie

Wordt in afb. 5 de spiegel S_2 met een snelheid V naar links bewogen, dan is de frequentie f van de teruggekaatste straling veranderd met een bedrag

$$\Delta f = 2 \cdot \frac{V}{C} \cdot f,$$

waarin C de lichtsnelheid is.

Plaatst men bij O een fotogevoelige detector, dan meet men de resulterende intensiteit.

Stel E_1 is de elektrische veldsterkte van de straling die via S_1 is gereflecteerd, en E_2 idem via S_2 ; dan geldt:

$$E_1 = A \sin 2\pi ft$$

$$E_2 = A \sin 2\pi (f + \Delta f)t.$$

Opn. De opstelling werkt analoog aan een heterodyne-detectieschakeling, waarbij E_1 de lokale oscillator, E_2 het signaal en de fotodetector de mixer voorstelt.

De resulterende intensiteit is evenredig met

$$\begin{aligned} (E_1 + E_2)^2 &= A^2 \{ \sin 2\pi ft + \sin 2\pi (f + \Delta f)t \}^2 \\ &= 4A^2 \sin^2 2\pi \left(f + \frac{\Delta f}{2} \right) t \cos^2 2\pi \frac{\Delta f}{2} t. \end{aligned}$$

De gemiddelde intensiteit van het signaal wordt

$$2A^2 \cos^2 \pi \Delta f t = A^2 \{ 1 + \cos 2\pi \Delta f t \}.$$

Men meet dus de verstemming ten gevolge van de snelheidscomponent van het doel in de waarnemingsrichting.

Er is verondersteld, dat het faseverschil tussen E_1 en E_2 langs de detector constant is (coherente detectie). Hieruit volgt, dat het gezichtsveld φ van een coherent detectiesysteem gering is:

$$\varphi \sim \frac{\lambda}{2D}, \text{ waarin}$$

λ = golflengte van de laserstraling;

D = diameter van de detector.

Toepassing van coherente detectie heeft het additionele voordeel, dat een belangrijke winst in signaal/ruisverhouding kan worden verkregen.

Opgemerkt wordt, dat de optredende frequentieveranderingen Δf in het optische gebied groot

zijn. Voor $\lambda = 10 \mu\text{m}$ en $V = 300 \text{ msec}^{-1}$ vindt men

$$\Delta f = 60 \text{ MHz.}$$

Met een dergelijke dopplerradar is de snelheidscomponent van het doel in de waarnemingsrichting nauwkeurig te bepalen.

Voor $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ en $V = 10^{-2} \text{ msec}^{-1}$ is de dopplerverschuiving 32 kHz.

Voor civiele doeleinden worden eveneens laser-dopplersnelheidsmeters ontwikkeld. Hiermee kan o.a. het snelheidspatroon van deeltjes in stromende vloeistoffen en gasen nauwkeurig worden gemeten.

4.7. Ringlaser; lasergyro's

Wanneer een gaslaser wordt opgenomen in een ringvormige resonatorconfiguratie (zie afb. 13) kan men de resulterende veldverdeling opgebouwd denken uit lopende golven die hetzij met de klok mee hetzij tegen de klok in draaien. Bij stilstand van de laserconfiguratie is de frequentie van beide golven gelijk. Wanneer de laserconfiguratie roteert om een as, loodrecht op het vlak van de laserconfiguratie, treedt een frequentieverschil Δf op tussen links- en rechtsom draaiende golven:

$$\Delta f = \frac{2\Omega A}{C}, \text{ waarin}$$

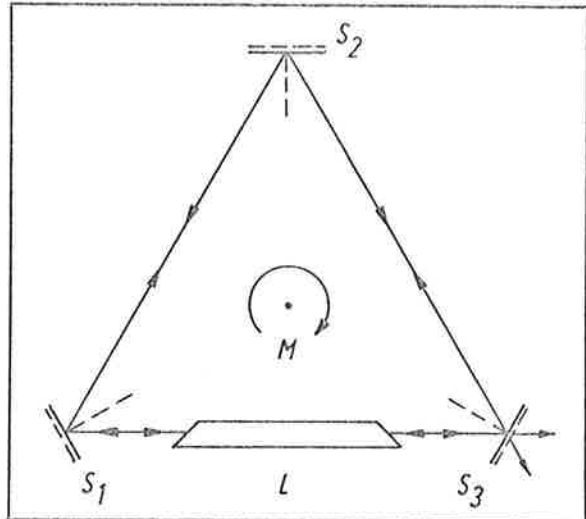
Ω = hoeksnelheid (radsec^{-1});

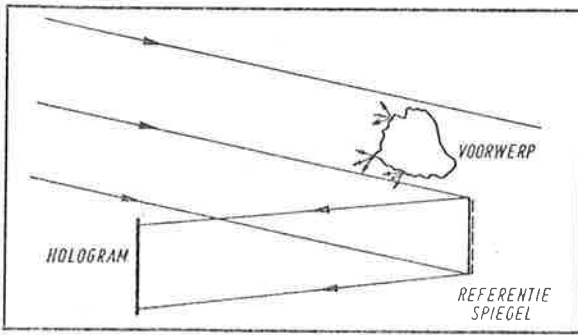
A = de door de lichtweg omsloten oppervlakte;

C = de lichtsnelheid.

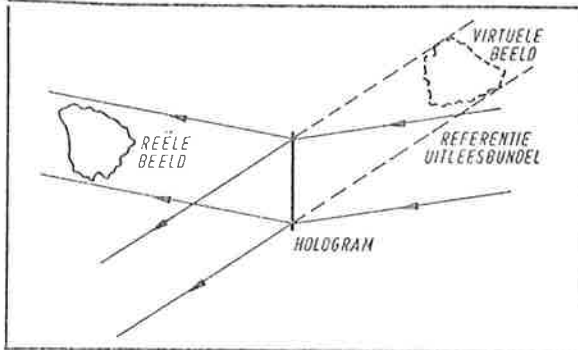
Afb. 13 Principe van de ringlaser

L laserplasmabuis, S_1 , S_2 hoogreflecterende spiegels, S_3 uitkoppelspiegel





Afb. 14 Holografie: opname



Afb. 15 Holografie: reconstructie

Dit frequentieverschil kan met een detector, analoog aan de in § 4.6 beschreven detectiemethode, worden gemeten. In principe kunnen zeer kleine draaisnelheden Ω worden gemeten. In de praktijk wordt de kleinste draaisnelheid bepaald door ongewenste koppelingen tussen links- en rechtsom draaiende golven t.g.v. reflecties, verstrooiingen enz.

Het voordeel van de lasergyro is, dat er geen bewegende delen zijn en dat het systeem bestand is tegen grote versnellingen.

4.8. Communicatie met behulp van lasers

Door de grote beschikbare bandbreedte is het mogelijk zeer veel informatie met behulp van een laserbundel te transporteren. Door het (nog) ontbreken van geschikte modulators met een voldoende grote bandbreedte is op dit moment deze capaciteit nog slechts zeer ten dele benut.

In een geplande breedband-laser-satelliet-communicatieverbinding, ontwikkeld door Lockheed Missiles and Space Co wordt een bandbreedte van 400 MHz toegepast. Een aantal televisiekanalen, geluidskanalen en informatieoverdrachtskanalen is parallel beschikbaar. Men streeft ernaar in 1975 een bandbreedte van 1000 MHz te realiseren.

De atmosferische verzwakking beperkt de toepassing op de begane grond. Voor de golflengte van

de kooldioxydelaser is de transmissie gunstig. Televisiebeelden zijn hiermee over een afstand van ruim 30 km ontvangen. Met een uitgestraald vermogen van enkele watts is de signaal/ruisverhouding onder goede weersomstandigheden 60 dB.

Voor eenvoudige communicatiedoelinden over korte afstanden in het veld worden gepulste diodelasers gebruikt. De apparatuur is klein, licht en bij serieproductie betrekkelijk goedkoop. Door de geringe bundelbreedte is afluisteren en storen moeilijk.

4.9. Ontsteking van nabijheidsbuizen

Door zijn kleine afmetingen, gering gewicht en lage prijs is een diodelaser zeer geschikt om als sensor in nabijheidsbuizen te worden ingebouwd.

4.10. Verwoestende straal

De energieën en vermogens die met lasers kunnen worden bereikt, zijn zo groot dat bij focussing aanzienlijke schade aan vliegtuigen, helikopters en geleide projectielen zou kunnen worden toegebracht. In de open literatuur zijn, overigens onbevestigde, berichten verschenen dat in het buitenland met dergelijke laserwapens wordt geëxperimenteerd. De technische problemen, die zich bij de toepassing voordoen, o.a. de opwekking van het nodige vermogen gedurende een zekere tijd, de focussing door de atmosfeer en het richtprobleem, lijken erg groot te zijn.

4.11. Holografie

De betekenis van het woord holografie is: alles opschrijven. Men bedoelt hiermee, dat het met behulp van deze techniek mogelijk is driedimensionale beelden, inclusief diepte en parallax, weer te geven na registratie op een tweedimensionele fotografische plaat.

Daartoe laat men het door het voorwerp verstrooide licht, te zamen met dat van een goed gedefinieerde referentiebundel, op een fotografische plaat vallen (afb. 14). Er wordt voor gezorgd, dat er op ieder moment een vast verband is tussen de fase van het licht dat op het voorwerp valt en de fase van het referentielicht, bv. door gebruik te maken van een laser als lichtbron.

Plaatst men de hologramplaat na het ontwikkelen weer in dezelfde positie als bij de opname en laat men het referentielicht uit de oorspronkelijke richting invallen, dan ziet men het voorwerp, inclusief de diepte, achter de hologramplaat gereconstrueerd (afb. 15). Verplaatst men de ogen, dan uit zich de parallax in het tafereel.

De mogelijkheid wordt onderzocht om piloten bij landingen waarbij het zicht slecht is, door middel van een, vanaf de grond bestuurbare, holografische display een driedimensioneel beeld van de landingsbaan, gezien uit de positie van het vliegtuig, te presenteren.

4.12. Toepassing van de holografie voor de opslag van informatie

Het blijkt dat ieder oppervlakte-elementje van het hologram informatie bevat van het gehele voorwerp, gezien uit de positie van het elementje.

Uit een analyse volgt, dat men op een hologramplaat erg veel informatie kan opslaan.

In plaats van voorwerpen kan men ook gegevens, die in een code van zwarte of transparante hokjes staan geregistreerd, op een hologramplaat vastleggen. Men probeert dergelijke holografische gegevens te construeren [5]. De theoretische capaciteit is zodanig, dat de inhoud van 15 boeken van 500 bladzijden met 500 woorden per bladzijde op een hologramplaat van 10×10 cm kan worden opgeslagen. De tijd, die nodig is om de informatie aan het geheugen te onttrekken is betrekkelijk kort (1 μ sec).

TABEL 2

Lasermateriaal	λ (μ m)	Freq. (Hz)	Pu (MW)
Robijn	0,69	2	10^2
	1,06	50	10
	1,06	2 kHz	10^{-1}
Neodymium	1,06	continu	10^{-3}
	0,53	50	10^{-1}
	0,53	2 kHz	10^{-3}
	0,53	continu	10^{-6}
Helium-neon	0,63	continu	10^{-7}
Kooldioxyde	10,6	continu	10^{-3}
— TEA	10,6	100	10^2
— gasdynamisch	10,6	continu	10^{-1}
Galliumarsenide	0,85	20 kHz	2.10^{-3}
Kleurstof	0,4 - 1,0	10	10^{-1}
Erbium	1,56		1

4.13. Toepassing van de holografie voor de verwerking van informatie

In afb. 15 is geschetst hoe men het voorwerp kan reconstrueren door de referentiebundel op de hologramplaat te laten vallen. Het omgekeerde is eveneens waar: laat men de lichtverdeling afkomstig van het voorwerp op de hologramplaat vallen dan wordt de referentiebundel opgewekt. Ook wanneer er een zekere mate van overeenstemming bestaat tussen het licht dat invalt en de oorspron-

TABEL 3

Militaire toepassingen van lasers														
	afstandmeter	hoogtemeter	doelaanwijzer	volgradar	dopplerradar	gated viewing	onderwaterdetectie	communicatie	lijns scanner	verwoestende straal	data processing	geheugen	beproevingen	gasdetectie
Robijn	x									x				x
Neodymium (1,06 μ m, 50 Hz)	x	x	x	x		x				x				
(1,06 μ m, 2 kHz)		x	x	x										
(1,06 μ m, C.W.)		x	x	x				x	x					
(0,53 μ m, 50 Hz)		x		x		x	x							x
(0,53 μ m, 2 kHz)		x		x		x	x							
(0,53 μ m, C.W.)		x		x					x					
Helium-neon		x							x		x	x	x	
Kooldioxyde														
— TEA			x	x	x			x	x					
— gasdynamisch											x			
Galliumarsenide		x				x		x						
Kleurstof	x		x			x	x							x
Erbium	x													

kelijke lichtverdeling, die op het hologram is geregistreerd, ontstaat er een output. Het resultaat is afhankelijk van de mate van overeenstemming (de correlatie) tussen beide lichtverdelingen.

Op deze wijze is het mogelijk optische correlators te construeren. De capaciteit van een dergelijke correlator is erg groot. Een probleem vormt nog het vinden van een geschikt materiaal om elektrische signalen in de vorm van een optische parameter te registreren. Hiernaar wordt in vele laboratoria in de wereld naarstig gespeurd.

4.14. Detectie van strijdgassen op afstand

In het spectrum van de laserstraling die aan gaswolken wordt terugverstrooid komen nieuwe spectraallijnen voor, die karakteristiek zijn voor de samenstelling van het gas waaraan het laserlicht is verstrooid. De analyse van het spectrum van de straling, die wordt ontvangen na terugverstrooiing aan een gaswolk, levert dus de interessante mogelijkheid om na te gaan of dit een strijdgaswolk is.

5. Conclusie

In dit artikel is een groot aantal toepassingen van

de laser voor militair gebruik genoemd. Het overzicht is echter niet uitputtend; er zijn meer toepassingsmogelijkheden. Het moment, waarop laserapparatuur in systemen wordt geïntroduceerd is duidelijk aangebroken. Vooral in combinatie met andere elektro-optische apparatuur en eventueel bestaande radarapparatuur zijn er ongetwijfeld grote mogelijkheden.

Voorts zal de research op lasergebied zelf (gasdynamische lasers, chemische lasers, TEA-lasers, afstembare lasers) ook weer nieuwe toepassingsmogelijkheden scheppen. In een tijd, waarin de opslag, het transport en de verwerking van informatie dermate belangrijk zijn geworden, zullen de aan de laser inherente grote mogelijkheden op dit gebied hun toepassing vinden.

Er zal echter nog veel research moeten worden verricht alvorens de grote potentiële mogelijkheden van de toepassing van lasers zijn geëvalueerd en ten volle benut.

In tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de lasers, die op dit moment het meest geschikt lijken voor militaire toepassingen. In tabel 3 zijn de militaire toepassingsmogelijkheden van deze lasers samengevat.

Literatuur

1. J. L. Emmett — *Physics today* (1971)(3)24.
2. R. E. Mallison e.a. — *Proc. Electro-optical systems and design conf.*, New York (1970)415.
3. B. Miller — *Aviation Week & Space Technol.* (1971)(14)48.
4. T. Bakker — *Rapp. Phys. Lab.* (1970)(7).
5. L. K. Anderson — *Bell Lab's Rec.* 46(1968)(10)318.

