

Obr. 13.4: Injekční polovodičový laser

motné technice laserů, protože jsou využívány jako zdroje záření pro buzení pevnolátkových laserů. Pevnolátkové lasery se tím stávají mnohem kompaktnější a s tímto buzením konkurují laserům barvivovým a plynovým. Účinnost polovodičových laserů dosahuje 50 až 60%.

Příklady ke kapitole 13:

- 13.1 Co je výhodnější pro zvýšení účinnosti polovodičového laseru – zvýšení nebo snížení teploty?
- 13.2 Jaký je vliv změny teploty na spektrum zesílení polovodičového laseru?

## Kapitola 14

### Aplikace laserů

Laser se za dobu třiceti let od svého vzniku uplatnil v celé řadě oborů [20]. Jako přístroj se dnes využívá v medicíně, při různých technologických operacích ve výrobě, v astronomii, geodesii, metrologii, chemii, biologii, spektroskopii, v energetice, ve výpočetní technice, v technice spojů, ve vojenské technice, v automatizaci a dálkovém řízení. Podívejme se na některé z těchto aplikací.

#### 14.1 Lasery v medicíně

Léčivou moc slunečních paprsků znali lidé odedávna. Moudrost, že slunce léčí lidské nemoci, se traduje již ze starověku a uctívání Slunce jako boha přinášejícího zdraví je pravděpodobně staré jako lidstvo samo. Teprve koncem osmnáctého století začaly být soustavně shromažďovány údaje o vlivu slunce na lidský organismus. Podnětem k tomu byly významné objevy v oblasti optiky. Bylo zjištěno, že sluneční světlo obsahuje celý soubor viditelných barev. Brzy na to se ukázalo, že ve slunečním spektru jsou obsaženy i neviditelné barvy — infračervená a ultrafialová. Před medicínou vyvstal úkol objasnit, jak všechny tyto druhy viditelného i neviditelného záření působí na člověka. V roce 1940 německý oftalmolog Gerd Meyer-Schwicherath ukázal, že světlo (bylo to směřované a koncentrované sluneční záření) může být užito k léčení

odtržené části sítnice lidského oka. V roce 1949 byla provedena první úspěšná operace a o několik let později Zeiss sestrojil první oční fotokoagulátor s výkonovou xenonovou lampou. Tento přístroj byl vytlačen až laserovými přístroji. Dá se říci, že medicína byla ze všech pozdějších aplikací laseru nejvíce připravena na okamžité využití laserového záření, což se také potvrdilo ihned po objevu laseru. Už v roce 1961 Ch.H.Townes přednesl na mezinárodním kongresu pro biofyziku ve Stockholmu přednášku „Optické masery (lasery) a jejich možné využití v biologii“. V témže roce byl rubínový laser použit k přivaření odchlípnuté sítnice a Samuel Fine a Paul E.McGuff z Bostonu a Edmund Klein z Buffala vyzkoušeli působení laseru na kůži a kožní nádory. V téže době Leon Goldman (z dětské nemocnice v Cincinnati) použil laseru k odstranění „ohně“ (červených skvrn na kůži) a skupina vedená Charlesem J.Campbellem (New York Columbia Presbyterian Hospital) provedla úspěšné operace opět s odchlípnutou sítnicí. V roce 1965 Hugh Beckman (Sinai Hospital of Detroit) ukázal, že laserem lze provádět i operace duhovky, tzn. dokázal, že laser je užitečným nástrojem nejenom jako koagulující přístroj, ale i jako nástroj chirurgický. V témže roce G.J.Jako (Harvard Medical School) demonstroval využití *Nd* skleněného laseru jako chirurgického nože. Po objevu  $CO_2$  laseru v roce 1964 C.K.N.Patelem z Belových laboratoří byl ověřen první chirurgický  $CO_2$  laser. Následovala řada dalších objevů – začal rozvoj nového odvětví vědy i aplikací tzv. *laserová medicína*. Laser pronikal a proniká postupně do mnoha odvětví: oftalmologie, dermatologie, plastické chirurgie, neurochirurgie, otolaryngologie, urologie, gynekologie a dalších. Zájem lékařů o tento nový druh světelného záření je pochopitelný a plyne z unikátních vlastností laserového záření, kterými jsou: monochromaticnost, koherence, kolimovanost, vlastnosti, které umožňují oproti původním zdrojům světla lepší přesnost zásahu a větší účinek daný mnohonásobným výkonem laserového světla. Vlastnosti — monochromaticnost a koherence jsou užity primárně na poli lékařské diagnostiky. Malá rozbíhavost (divergence) laserového světla a jeho možnost koncentrace velmi vysoké světelné intenzity

v ohnisku čočky je základním parametrem důležitým pro terapeutické účely. Aplikace v chirurgii využívají konverze laserového záření na teplo uvnitř tkáně, jehož výsledkem je řezání a koagulace. V současné době lze laserovou chirurgii rozdělit na 5 oblastí podle stupně rozpracování – „zralosti“ té které disciplíny: od 1. veterána – oftalmologii přes 2. gastroenterologii a gynekologii. 3. dermatologii, plastickou chirurgii a neurologii, 4. urologii, hrudní chirurgii a obecnou chirurgii, až 5. po nově ověřované aplikace v onkologii, ortopedii, stomatologii a kardiovaskulární chirurgii.

Podívejme se podrobněji na použití laseru v oftalmologii, kde se laserového světla začalo používat nejdříve. Laserového světla se užívá v očním lékařství pro velmi složité operace, jakými jsou např. přichycení odchlípené oční sítnice, operace šedého a zeleného zákalu, léčení diabetické retinopatie (choroby sítnice způsobené cukrovkou), otevření předního nebo zadního pouzdra čočky atd. Všechny tyto operace lze pomocí laseru provádět bez vyjmutí oka, což umožňuje neporušit jeho celistvost, zamezit vniku infekce a dalších komplikací. Operace jsou rychlé, méně bolestné a lze je provádět i ambulantně. K očním operacím se dnes používá celá řada laserů. Prvně použitý rubínový laser byl při operacích sítnice nahrazen kvazikontinuálním argonovým laserem, pro operace předního pouzdra čočky se používá nejvíce *Nd:YAG* pulsní laser a ve stadiu výzkumu a prvních klinických zkoušek je použit excimerového, *Er:YAG* a *Ho:YAG* laserů pro operace čočky. Příklad oftalmologického laseru pro mikro-chirurgii oka je uveden na obr. 14.1.

## 14.2 Laserové technologie

Nově vzniklé odvětví tzv. laserovou technologií si můžeme definovat jako opracování materiálu založené: 1. na využití schopnosti laseru koncentrovat optickou energii v prostoru, čase a spektrálním intervalu a 2. na interakci optického záření s látkou. Do tohoto odvětví patří dnes mnoho nových oborů zahrnujících laserové svařování, vrtání, řezání (dekorace skla, rýhování,

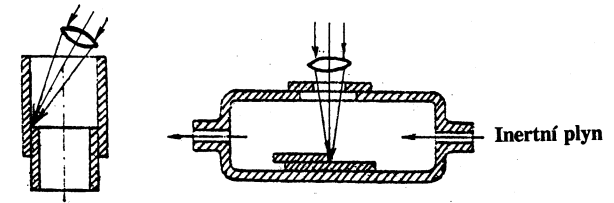


Obr. 14.1: Fotografie impulsního *Nd:YAG* laseru OFTALAS vyvinutého pro oční mikrochirurgii na ČVUT-FJFI

trimování), žíhání, naprašování. Optický svazek vystupující z laseru lze pomocí optiky soustředit na malé plochy o průměru 10 až 100  $\mu\text{m}$ , což má za následek zvýšení hustoty výkonu  $I$  optického svazku na hodnotu  $I = 10^{12}$  až  $10^{16} \text{ Wcm}^{-2}$ . Při interakci záření s pevnou látkou dochází nejprve k jejímu ohřevu a tavení ( $I = 10^6$  až  $10^7 \text{ Wcm}^{-2}$ ) a nakonec k jejímu odpaření ( $I = 10^8$  až  $10^{12} \text{ Wcm}^{-2}$ ). Základní předností laserových technologických operací je možnost opracování bez mechanického kontaktu s výrobkem (opracování na dálku, v ochranné atmosféře), možnost opracování obtížně přístupných částí materiálu a technologické zpracování materiálů klasickými metodami těžce opracovatelných.

### 14.2.1 Laserové svařování

využívá optického záření k *roztavení* materiálu do požadované hloubky s minimálním odpařením povrchu. V praxi se používají nejvíce *Nd:YAG* lasery a  $\text{CO}_2$  lasery. Svařování ve srovnání s dalšími aplikacemi vyžaduje menší intenzitu záření optického svazku a větší délku laserového impulsu. Výhodou svařování laserem je absence fyzického kontaktu s elektrodou, lokalizovaný ohřev a rychlé chladnutí, schopnost svařet různorodé materiály a geometrie, schopnost svařet součástky v dané atmosféře nebo zatavené uvnitř opticky transparentního materiálu (viz obr. 14.2). Laserovým svařováním se např. spojují hermetická pouzdra miniaturních relé, kardiostimulátory (viz obr. 14.3), tranzistory, hybridní obvody, svařují se různé kontakty v mikroelektronice nebo plechy v automobilovém průmyslu.

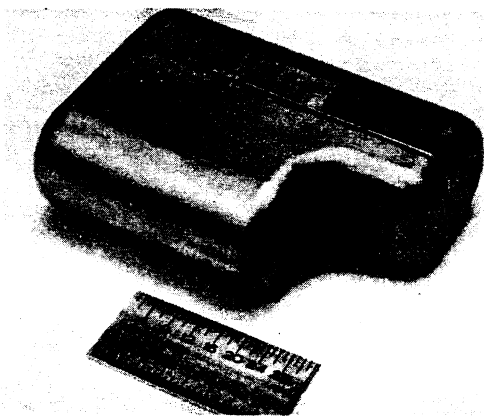


Obr. 14.2: Příklady laserového svařování

a) v těžce dostupných místech, b) v inertní atmosféře (b).

### 14.2.2 Laserové vrtání

je založeno na odstraňování materiálu *odpařováním*. Intenzita svazku musí být vyšší než v předchozích případech, a proto se pro tento účel používá impulsních laserů s délkou impulsu menší než 1 ms. První laserové vrtání bylo provedeno již v roce 1965, kdy byl rubínový laser použit pro vrtání otvorů v diamantových průvlacích pro tažení drátů. V současné době se pro laserové



Obr. 14.3: Laserem svařené pouzdro kardiostimulátoru  
z titanového materiálu

vrtání využívají další pevnolátkové lasery *Nd:YAG* a *Nd:sklo*. Předností laserového vrtání je vytváření malých otvorů o průměru od  $10\ \mu\text{m}$  do  $100\ \mu\text{m}$  i v místech, kde je to pomocí jiných metod obtížné nebo nemožné.

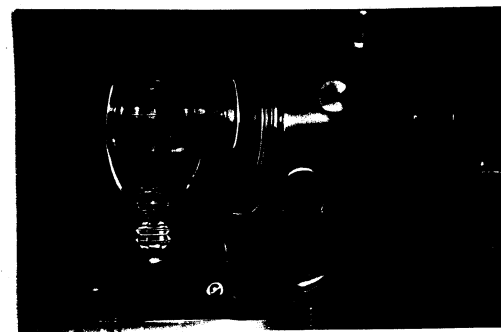
#### 14.2.3 Laserové řezání

se využívá v případě, kdy je nutné oddělit materiál s malou tepelnou vodivostí. Při laserovém řezání je snahou *odpařit* materiál co nejrychleji při zachování co nejmenší oblasti zasažené tepelnými účinky. Nejpoužívanějšími lasery v tomto oboru jsou kontinuální  $CO_2$  lasery se středním výkonem do 15kW. Ve většině průmyslových aplikací využívajících laserové řezání se přivádí koaxiálně s laserovým svazkem na místo řezání proud plynu. Pro řezání kovů se přivádějí reaktivní plyny, jako např. kyslík. Dochází pak k exotermické reakci, která urychluje proces řezání. Tímto způsobem jsou řezány např. titan, oceli

s nízkým obsahem uhlíku a nerezové oceli. Pro řezání nekovových materiálů, jako jsou keramika, plasty a dřevo, je na místo řezání přiváděn inertní plyn, sloužící pouze k odstraňování roztaveného a odpařeného materiálu. Tímto způsobem lze řezat rovněž textilní materiály, papír a sklo.

#### 14.2.4 Dekorace skla laserem

je jistou modifikací laserového řezání. V místě dopadu sfokusovaného laserového záření na povrch skla dojde k částečnému odpaření skloviny a k jejímu povrchovému popraskání. Na vzniklých trhlinách dochází k rozptylu světla a tím se docílí zářivého vzhledu dekoru. Pro dekoraci skla se využívá laserů, jejichž záření je sklem dobře absorbováno, např. kontinuálního  $CO_2$  laseru. Příklad dekorování poháru kontinuálním  $CO_2$  laserem a o výkonu 100 až 200 W je uveden na obr. 14.4.



Obr. 14.4: Dekorace poháru zářením  $CO_2$  laseru

#### 14.2.5 Laserové značkování

je založeno na místním odpaření materiálu nebo změně barvy na povrchu daného elementu. Laserový svazek v tomto případě prochází maskou, ve které jsou vyříznuty znaky (písmena, číslice). Při dopadu záření na povrch materiálu vzniká na povrchové vrstvě obrazec daný předlohou. Znaky sloužící k

identifikaci předmětů je možno nanášet na polovodičové, keramické a kovové povrchy, dále na papír, sklo, plasty, feritové elementy atd. Značkové objekty jsou buď v klidu, nebo se pohybují. Výška znaků je obvykle zlomky až jednotky milimetrů, tloušťka odpařené vrstvy materiálu je v řádu mikrometrů. Pro tuto aplikaci se používají výkonové impulsní lasery s energií v impulsu až desítky joulů nebo kontinuální lasery. Předností laserového značkování je bezkontaktní zhotovování znaků a tím vyloučení případných deformací a napětí ve značkováném materiálu.

#### 14.2.6 Laserové kalení

je tepelné zpracování kovů, využívající k jejich rychlému *ohřevu* optického záření laserů. Výhodou oproti jiným způsobům ohřevu je opět možnost lokalizovaného tepelného zpracování i na místech jinými způsoby nepřístupných a prakticky bezdeformační zpracování. V průmyslu se především používá této metody pro tzv. transformační zpevňování některých namáhaných automobilových součástí. Používá se zpravidla kontinuálních  $CO_2$  laserů o výkonu několika tisíc wattů.

### 14.3 Laser v mikroelektronice

Od počátku sedmdesátých let se začaly objevovat technologie jako dolaďování jmenovitých hodnot odporů, kondenzátorů a elektrických filtrů. Běžně se dnes používá laserového rýhování pro dělení podložek z keramiky, křemíku nebo arsenidu galia. Všechny uvedené technologie jsou založeny na odstranění tenké vrstvy materiálu formou jeho *vypaření*, k čemuž dochází následkem ozáření intenzivním laserovým svazkem. Laser se používá k opravě polovodičových pamětí, kdy jsou laserem odpojeny poškozené obvody a místo nich připojeny jiné. Rozvíjejí se metody laserového *dopování* příměsí do substrátu: zářením je rozložen nad povrchem substrátu plyn obsahující dopující příměs, při současném místním roztavení podložky. Zářením uvolněný dopant pak

difunduje do podložky. Laserem jsou opravovány poškozené matrice pro litografii, odstraňovány nečistoty s povrchu materiálu, iniciován růst křemíku na izolační vrstvě  $SiO_2$  atd. Nové typy mikroelektronických součástek lze vytvářet laserovou *depozicí* tenkých vrstev, kdy je materiál terče odpařen laserovým svazkem, přičemž páry kondenzují na podložce a vzniklá tenká vrstva je stechiometricky shodná s materiálem terče. Jsou deponovány supravodivé, ferroelektrické a feromagnetické vrstvy a vícevrstvé struktury. Z vrstev jsou zhotovovány např. nové druhy nedestruktivních pamětí, supravodivé kvantové magnetometry atd.

#### 14.3.1 Laserové dolaďování

je způsob justování jmenovitých hodnot pasivních součástek elektronických obvodů, zejména tenkovrstvových a tlustovrstvových odporů a kapacit hybridních integrovaných obvodů a válcových odporů. Laserové dolaďování spočívá ve vyřezávání korigující drážky v odporové vrstvě, což změní hodnotu elektrického odporu. Soustředěný laserový svazek dopadající na vrstvu způsobí její místní odpaření. Nejčastěji je používán *Nd:YAG* laser s kontinuálním buzením v režimu periodické modulace jakosti rezonátoru. Špičkový výkon je obvykle v rozmezí 2 až 20 kW při délce impulsu 0,1 až 1  $\mu s$  a opakovací frekvenci 1 Hz až 100 kHz. Intenzita laserového záření na povrchu odporového materiálu dosahuje hodnot  $10^6$  až  $10^7$   $Wcm^{-2}$ . Minimální šířka drážky je 5 až 10  $\mu m$ . Pro laserové dolaďování se používá i  $CO_2$  laser. Tato bezkontaktní metoda dolaďování umožňuje dosahovat vysokých rychlostí a přesností justáže a konstruovat odpory menších rozměrů. Běžné zařízení s *Nd:YAG* laserem umožňuje doladit několik tisíc odporů za hodinu s přesností 0,1%. Při dolaďování hodnot kondenzátorů vytvářených na čipech je laserem odřezávána a tím zmešována plocha jedné z desek tvořících kondenzátor, popř. je hodnota kapacity ještě dolaďována propalováním otvorů do kondenzátorových vrstev.

### 14.3.2 Laserové rýhování

se provádí zejména v mikroelektronice pro docílení snadného a definovaného dělení základního substrátu integrovaných obvodů. Pro laserové rýhování podložek z křemíku a arsenidu galia se používá nejčastěji kontinuálního  $Nd:YAG$  laseru s periodickou modulací jakosti rezonátoru, se špičkovým výkonem 1 až 40 kW, délkou impulsu 0,15 až 0,3  $\mu s$  a opakovací frekvencí 1 až 40 kHz. Laserový svazek intenzity  $10^{12}$  až  $10^{13} \text{ Wm}^{-2}$  taví a odpařuje substrát a takto vytvořené rýhování definuje tvar elementů, jež získáme po rozlámání podložky. Pro dosažení optimálních pnutí v podložce, a tím minimálního poškození elementů dělením, se volí hloubka rýh asi 25 až 30% tloušťky podložky. Laserovým rýhováním lze získat elementy o délce strany 0,35 mm. Pro rýhování keramických podložek, safíru i skla se kromě  $Nd:YAG$  laseru používá i impulsní  $CO_2$  laser obvykle se špičkovým výkonem 20 až 50 W, délkou impulsu 0,1 až 5 ms a opakovací frekvencí 100 Hz až 1 kHz.  $CO_2$  laserem do podložky se při laserovém rýhování vrtají podél zamýšlené čáry dělení otvory, jejichž průměr bývá 70 až 200  $\mu m$  při vzdálenosti děr 75 až 100  $\mu m$ . Výhodou laserového rýhování je rychlé tvoření dělicí čáry (rychlost 10 až 15  $\text{cms}^{-1}$ ) s malou šířkou řezu a vysoká výtěžnost nepoškozených elementů z podložky.

### 14.3.3 Laserové žíhání

Další aplikací, při které dochází ke změně struktury materiálu v důsledku místního ohřevu, je laserové žíhání. Používá se zejména pro *rekrytalizaci* krystalické mřížky substrátů mikroelektronických obvodů poškozených při iontové implantaci. Laserové záření je obvykle absorbováno v tenké povrchové vrstvě, jejíž hloubka je asi 40 až 450 nm. Po dopadu laserového záření dochází k rekrytalizaci materiálu. Lasery používané pro tuto aplikaci jsou pulsní rubín,  $Nd:YAG$ , alexandrit nebo kontinuálně běžící argon. Pro žíhání se tradičně užívalo ohřevu podložky v elektrické peci při teplotě zhruba 1000°C po

dobu asi půl hodiny. Dlouhodobé působení tepla na podložku tloušťky asi 1 mm a průměru 10 až 15 cm má za následek nejen změny ve vytvořených strukturách, ale i vznik mechanického pnutí a poškození podložky. Laserové žíhání tyto problémy odstraňuje, má však konkurenci v žíhání nekoherentními zdroji světla, které jsou zatím levnější. S postupující miniaturizací však význam laserového žíhání poroste.

### 14.3.4 Laserová litografie

Litografie je technologický proces, který umožňuje přenesení obrazu půdorysného uspořádání určité optické, optoelektronické nebo mikroelektronické struktury součástky popřípadě obvodu na polovodičovou nebo dielektrickou podložku. Laserová litografie používá pro exponování fotocitlivé vrstvy materiálu laserového záření. Vrstva je ozářována přes masku, ve které je vyřezána struktura budoucího obvodu (rozložení prvků, kontaktů, spojů atd.). Ozářením substrátu vrstvy jsou na jeho povrchu na záznamovém materiálu (fotorezistu) vyznačeny oblasti, které budou podrobeny dalším procesům (např. depozici materiálu, difuzi, leptání atd.). V místech, kde je fotorezist exponován, vyvolá v něm záření fotochemické změny a vzniklou strukturu lze odleptat. Pro dosažení ostrého obrazu struktur tvořených na podložce se při exponování fotorezistu používají zdroje emitující záření v *ultrafialové* oblasti spektra (obvykle v pásmu 200 až 300 nm). Oproti zdrojům používaným v optické litografii (vysokotlaké  $Hg$  nebo  $Hg-Xe$  výbojky), lze s lasery docílit vyšších intenzit ozáření.

## 14.4 Laser v astronomii, geodézii a geofyzice

Velmi brzy po uvedení laseru do provozu byl laser použit v systému radaru jako vysílač záření. Pomocí tohoto tzv. laserového radaru jsou měřeny vzdálenosti k objektům, které odrážejí laserové záření zpět do směru přicházejícího svazku. Pro zvětšení intenzity do radaru se vracejícího záření se na měřené

objekty umísťujú tzv. laserové odražeče, např. koutové hranoly, jejichž charakteristickou vlastností je odraz přicházejícího záření do zpětného směru. Podle využití laserového radaru (v astronomii, geodezii, geofyzice nebo ekologii) se tyto odražeče umísťují na pozemní cíle, družice nebo na povrch Měsíce. Určení vzdálenosti je založeno na měření časového intervalu, který uplyne mezi vysláním impulsu optického záření a okamžikem návratu odraženého impulsu od měřeného objektu. Velikost dosahu laserového radaru plyne z energetické kalkulace přijatého signálu, která je popsána tzv. radarovou rovnicí [21]:

$$N = \frac{k N_v T_v T_p \sigma_d}{\theta_v^2 R^4}, \quad (14.1)$$

kde  $N$  je počet přijatých fotoelektronů,  $N_v$  – počet vyslaných fotonů,  $k$  – konstanta úměrnosti,  $\eta$  – účinnost fotonásobiče,  $\theta_v$  – úhlová rozbíhavost vysílaného svazku,  $T_v$ ,  $T_p$  – transmitance vysílající a přijímající optiky,  $\sigma_d$  – účinný průřez družice,  $R$  – vzdálenost objektu. Je tedy zřejmé, že velikost přijímaného signálu se zmenšuje úměrně čtvrté mocnině vzdálenosti. Dosah laserového radaru je do 20km při měření pozemních objektů, oblačnosti, letadel apod. (tj. většinou objektů bez laserových odrážeců). Vzdálenost 10000km byla dosažena při měření umělých družic Země a nejbližším objektem měřeným laserovým radarem jsou laserové odražeče umístěné na povrchu Měsíce (asi 380000 km). Přesnost měření vzdálenosti laserovým radarem je dána dosažitelnou přesností změření časového intervalu, geometrií měřeného objektu, konstrukcí a umístěním odražečů, přesností matematického modelu šíření optického záření atmosférou. Hodnota přesnosti se pohybuje od několika decimetrů dosahovaných při měření objektů bez odražečů, až k několika milimetrům při měření umělých družic Země.

Výsledky těchto měření poskytují přesné hodnoty délek stran trojúhelníků pro astronomická úhlová měření, slouží dále ke studiu dynamiky Měsíce a umělých družic Země. V geodézii byl vyhodnocením dlouhodobých laserových družicových měření určen tvar zemského geoidu s přesností na 10 cm. V geofyzice umožnila tato měření určit vzájemný pohyb částí pevnin (vzájemný

pohyb kontinentů dosahuje rychlosti 4 až 5 cm za rok). Výsledky těchto měření jsou významné také pro seismologii.

Jako laserové vysílače se v laserových radarech používají impulsní pevnolátkové lasery rubínové a  $Nd:YAG$ .

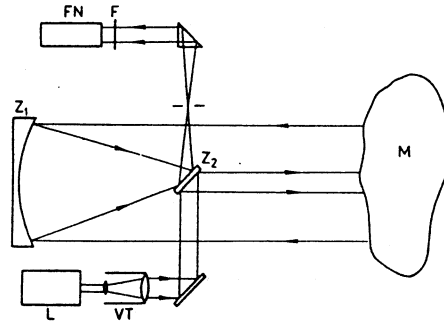
V geodézii našly uplatnění také lasery helium-neonové. Používají se pro vytyčování tras na Zemském povrchu i v podzemí.

#### 14.4.1 Laserový radar v ekologii

Pozemní laserové radary se používají k měření znečištění ovzduší (lidary), vody apod. Lidary využívají k měření několika fyzikálních principů. Vyslaný laserový impuls je při průchodu atmosférou rozptylován přítomnými molekulami a aerosoly. Část záření rozptýleného ve zpětném směru je soustředována teleskopem a detekována fotodetektozem. Přijatý signál, jehož amplituda je v každém okamžiku úměrná intenzitě rozptýleného záření, je zaznamenáván jako funkce času, což umožní určit vzdálenost rozptylujícího útvaru. Lidarem je přijímán signál vzniklý díky elastickému Mieovu rozptylu nebo Rayleighovu rozptylu na atmosférických složkách. Lidar slouží k monitorování rozložení a směru pohybu dýmových vleček, měření spodní hranice oblačnosti a profilu mraků, turbulence atmosféry, rozložení a profilu výskytu různých látek v ovzduší atd. Principiální schema lidaru je na obr. 14.5.

### 14.5 Laser ve výzkumu termojaderné syntézy

Laserový systém se v tomto případě skládá z generátoru, laserových zesilovačů a dalších optických prvků umožňujících přivést velkou energii laserového záření do malého objemu prostoru. Schematické uspořádání takového systému je na obr. 14.6. Laserový generátor  $G$  pracuje buď v režimu synchronizace módů nebo  $Q$ -spínání. Elektrooptická uzávěrka  $U$  propouští záření jen po velmi krátkou dobu. Děličem svazku  $D$  se vytvoří několik rovnocenných

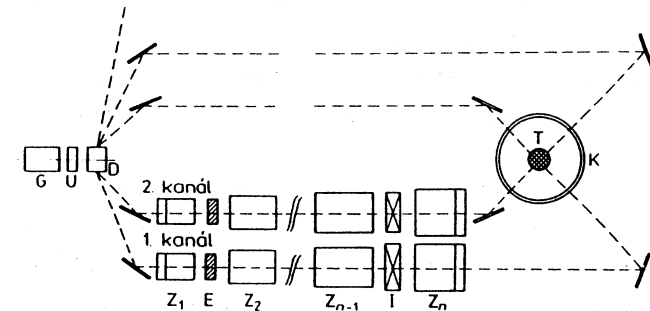


Obr. 14.5: Schéma lidaru s koaxiálním vysílačem a přijímačem

L – laser, VT – vysílací teleskop,  $Z_1$ ,  $Z_2$  – zrcadla Newtonova teleskopu, M – monitorovaná oblast, F – filtr, FN – fotonásobič

optických svazků, které jsou zaváděny do zesilovacích systémů. Každý kanál je tvořen soustavou laserových zesilovačů  $Z_1$ ,  $Z_2$ , ...,  $Z_n$ , jejichž příčné rozměry postupně narůstají tak, aby intenzita laserového záření nepřesáhla v žádném místě práh rozrušení optického materiálu. Mezi zesilovači jsou obvykle vloženy expandéry svazku E a optické izolátory I. Svazek optického záření vystupující z každého kanálu je fokusován čočkou nebo zrcadlem na terč T umístěný v interakční komoře K. Prostorové uspořádání systému je takové, aby byla zajištěna prostorová symetrie ozáření terče a současně aby impulsy optického záření dopadaly na terč ve stejný okamžik (stejně optické dráhy jednotlivých kanálů).

Různé experimentální varianty laserových systémů pro termojadernou syntézu byly realizovány v laboratořích bývalého SSSR, USA, Japonsku a v dalších zemích. Např. ve Fyzikálním ústavu P.N. Lebeděva v Moskvě bylo zkonstruováno zařízení DELFÍN s celkovou energií optického záření (po sečtení 216 paralelních kanálů) 10 kJ s dobou trvání impulsu 1 ns. V USA již v roce 1978 pracoval osmisvazkový laserový systém HELIOS s  $CO_2$  lasery s úhrnnou



Obr. 14.6: Schéma laserového systému pro termojadernou syntézu

energií 10 kJ. Tento systém byl složen ze čtyř dvousvazkových kanálů. Poslední výkonové zesilovače byly umístěny ve stejné místnosti jako interakční komora. O šest let později byl v téže laboratoři postaven ještě výkonnější systém se šesti kanály nazvaný ANTARES. V Lawrence Livermore laboratoři byly prováděny experimenty s dvanáctikanalovým laserovým systémem nazvaným SHIVA s neodymovými skly. Systémy zesilovačů obsahují každý 11 zesilovacích stupňů rozložených na dráze o délce 55 m. Energie optického záření na výstupu každého z kanálů je 1 kJ, délka trvání impulsu 0,1 až 0,5 ns. Jiným příkladem je zařízení GEKKO, které je dvanáctikanalové, má výstupní energii až 30 kJ a dobu trvání impulsu 0,1 až 1 ns.

## 14.6 Laser ve výpočetní technice.

Pro tuto aplikaci se využívají z důvodu malých rozměrů především polovodičové lasery. Do oblasti výpočetní techniky patří také i laserová tiskárna, která se dnes stává součástí vybavení výpočetních center. Laserová tiskárna je zařízení používající laserového záření k vytvoření obrazce, který má být tištěn, tj. přenášen z rotujícího válce na papír. Údaje o informaci, která má

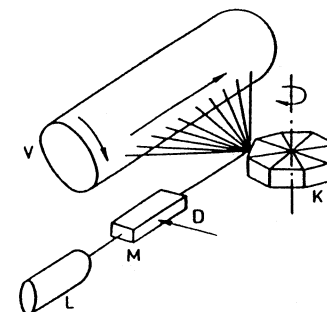


být tištěna jsou včetně zamýšlené grafické úpravy zakódovány v počítači a odtud jsou přiváděny na modulátor optického záření, který v souladu s kódováním přerušuje dráhu laserového svazku dopadajícího na odraznou plošku rozmítacího kotouče (viz obr. 14.6). Každá ploška na obvodu kotouče rozmítá svazek po celé délce válce. Válec je pokryt vrstvou fotocitlivého materiálu (např.  $CdS$ ), který má vlastnost, že po dopadu laserového záření se v ozářeném bodě zmenší elektrický odpor materiálu až o několik řádů. Je-li tato vrstva nabita před záznamem informace na konstantní potenciál  $U$ , pak se v ní po dopadu laserového záření vytvoří dle kódování obrazec složený z bodů, které mají potenciál odlišný od původního. Na předlohu vytvořenou takto na válci je elektrostaticky nanášeno tónovací médium, jehož přilnavost k válci je dána hodnotou potenciálu v jednotlivých bodech. Obrazec z válce je přenášen na papír. V laserových tiskárnách se převážně využívá helium-neonového laseru malého výkonu. Výhodou tohoto typu tiskárny je možnost dosažení kvalitního záznamu při vysoké rozlišitelnosti znaků a velkých rychlostech tisku (až desítky stran formátu A4 za minutu).

## 14.7 Laserová spektroskopie

Spektrum každé látky je složeno ze souboru charakteristických spektrálních čar, který studovanou látku jednoznačně určuje. Obor fyziky zaměřený na studium spektra, které vzniká v procesu interakce mezi látkou a elektromagnetickým vlněním, se nazývá spektroskopie. Prostřednictvím spektroskopie lze studovat kvantové přechody a usuzovat na energetické hladiny atomů, molekul a makroskopických soustav, a tak získat informaci o stavbě a vlastnostech látky (např. lze analyzovat prvky obsažené ve vzorku látky, získat informace o složení hvězd a galaxií atd.). Spektroskopii lze dělit podle různých hledisek, např.:

1. podle *vlnových délek* elektromagnetického záření obsažených ve studovaném spektru ji dělíme na radiospektroskopii; spektroskopii submili-



Obr. 14.7: Princip laserové tiskárny

L – laser, M – akustooptický modulátor, D – vstup dat, K – rozmítací kotouč, V – rotující válec; šipky ukazují smysl rotace válce, rozmítacího kotouče a směr rozmítání svazku na válci

metrovou; optickou (infračervenou, viditelného záření a ultrafialovou); rentgenovou a spektroskopii záření gama.

2. Podle studovaných *láték* lze spektroskopii dělit na atomovou (zkoumá atomová spektra), molekulovou (pro určování molekulových spekter) a spektroskopii krystalů atd.
3. Podle charakteru spektra lze určit spektroskopii *emisní, absorpční, fluorescenční, ramanovskou* atd.

Laserová spektroskopie využívá laserového záření pro vyvolání kvantových přechodů ve zkoumaných látkách. Vlastnosti laserového záření umožňují zvýšit citlivost detekce spekter. Úzká šířka spektrální čáry laserového záření dovoluje docílit vysokého rozlišení jednotlivých spektrálních čar studované látky. Při použití impulsních laserů generujících krátké a velmi krátké impulsy je možno studovat i rychle probíhající jevy trvající řádově  $10^{-6}$  až  $10^{-12}$  s. Velká směrovost laserového záření umožňuje provádět spektroskopické studie na dálku (používá se zejména při detekci znečištění ovzduší). Podle druhu

interakce dělíme laserovou spektroskopií na *lineární* a *nelineární*. Metodami nelineární laserové spektroskopie lze např. studovat i kvantové přechody, které nejsou při použití jiných zdrojů (výbojky atd.) detekovatelné. Lze takto stanovit skutečné šířky čar zastíněné dopplerovským rozšířením v důsledku tepelného pohybu částic atd. Používají se zejména přeladitelné barvivové lasery. V infračervené spektroskopii se využívají molekulární plynové lasery, polovodičové lasery a kapalinové lasery. Ve viditelné oblasti se používají zejména barvivové lasery, v ultrafialové oblasti lasery excimerové.

## 14.8 Laserová separace izotopů

je fotofyzikální metoda rozdělení izotopů, využívající optického posuvu v absorpčním spektru, při níž jsou atomy jednoho z izotopů převedeny monochromatickým laserovým zářením zdroje do vzbuzeného stavu, zatímco atomy ostatních izotopů zůstávají v základním stavu. Vzbuze­né atomy se ionizují např. opticky, elektrickým polem, srážkou s jinou částicí apod. a ionty separují pomocí vnějšího elektrického pole. Vzhledem k úzké spektrální čáře laseru lze excitovat i atomy s malým izotopickým posuvem, které jsou jinými metodami nese­parovatelné. Výhodou laserové separace je skutečnost, že energie vynaložená na separaci jednoho atomu je ve srovnání s jinými metodami poměrně malá, např. na separaci atomu uranu  $^{235}\text{U}$  je nutno vynaložit  $10^5$  eV, zatímco difúzní metodou separace až  $10^7$  eV. Nevýhodou laserové separace izotopů je nutnost separace v plynné fázi. Praktické využití metod laserové separace izotopů se předpokládají především pro potřeby jaderné energetiky, např. pro separaci izotopů uranu, vodíku a lithia a pro separaci izotopů stopových prvků.

# Kapitola 15

## Bezpečnost práce s lasery

### 15.1 Biologické efekty laserového záření

Laserové záření působící na lidskou tkáň způsobuje různý stupeň poškození tkáně. Největší nebezpečí představuje laserové záření pro lidské oko, menší, ale ne zanedbatelnou pro lidskou kůži.

Laserové ozáření tkáně může způsobit její poškození působením mechanismů a) teplotních, b) fotochemických, c) akustických, d) expozicí a e) dalšími ději.

ad a) Poškození tkáně *teplem*, které dodává na tkáň dopadající záření, je principiálně závislé na typu tkáně (jak absorbuje záření dané vlnové délky), na intenzitě dopadajícího laserového svazku, na velikosti ozá­řené plochy a době expozice. Vzhledem k velkému rozsahu možných hustot energií a výkonů laserového záření, teplotní efekty způsobené zářením na tkáni mohou být od neznatelných, kdy tkáň zůstane neporušena, přes jednoduché zarudnutí kůže, její spálení, odpaření až po úplné roztržení tkáně.

ad b) Jevy tohoto typu jsou většinou způsobeny zářením v *ultrafialové* oblasti spektra a nejsou ještě dokonale prozkoumány. Nicméně již dříve bylo zjištěno, že odezva tkáně při ozáření slunečním světlem obsahujícím ultrafialové záření je zčervenání kůže a její následné zhnědnutí nebo