

8. Aplikace laserů

Helena Jelínková, Zdeněk Kluíber

Úvod

Využití laserového záření v aplikacích nastalo téměř ihned po uvedení prvního laseru do provozu. Teodor Maiman sestrojil rubínový laser v roce 1960 a již v roce 1961 bylo záření tohoto laseru použito k léčení očních a kožních onemocnění. Za dobu více než třiceti let od svého vzniku se laser uplatnil v celé řadě oborů. Jako přístroj se dnes využívá v medicíně, při technologických operacích ve výrobě, v astronomii, geodézii, metrologii, chemii, biologii, spektroskopii, v energetice, ve výpočetní technice, v technice spojů, holografii, v automatizaci a dálkovém řízení, ve vojenské technice, v zábavním průmyslu, restaurátorství a v dalších aplikacích. Uveďme si některé hlavní vlastnosti laserového záření, které způsobují jeho tak všestranné využití.

Především je to energie a výkon přenesené v úzkém vyzářovacím svazku, dále monochromaticnost, koherence a kolimovanost, vlastnosti, které umožňují oproti původním zdrojům světla lepší přesnost zásahu a větší účinek daný mnohonásobným výkonem laserového světla. Podívejme se nejprve na použití laserů v medicíně, protože tam byly lasery použity nejdříve.

Lasery v medicíně

Rubínový laser byl vyzkoušen okamžitě po jeho uvedení do provozu, a to v oftalmologii (při operaci oční sítnice) a také v kožním lékařství (odstranění pigmentových skvrn). Lékaře přitahovala možnost koncentrace energie optického záření na malé ploše a možnost **řezání a odpařování tkání**. Pro tyto vlastnosti laser získal významné postavení v *laserové chirurgii*. Výhodou této techniky je možnost bezdotykového ostře ohraničeného řezu tkání a odstranění i velmi malých struktur bez poškození okolí a případného zanesení infekce do rány. Aplikace v chirurgii tedy využívají konverze laserového záření na teplo uvnitř tkáně, jehož výsledkem je řezání a koagulace. Vlastnosti laserového záření jako monochromaticnost a koherence jsou užity primárně na poli lékařské diagnostiky. S rozvojem laserové fyziky a s objevem dalších typů laserových přístrojů, laser pronikal a dále proniká postupně do mnoha odvětví jako jsou: *oftalmologie, dermatologie, obecná, plastická a kardiovaskulární chirurgie, neurochirurgie, otorhinolaryngolo-*

gie, urologie, gynekologie, stomatologie, onkologie, gastroenterologie, ortopedie a další.

Jako příklad si uveďme podrobněji použití **laserů v oftalmologii**. Laserového světla se užívá v očním lékařství pro velmi složité operace, jakými jsou např. přichycení odchlípené oční sítnice, odstranění zeleného zákalu, léčení diabetické retinopatie (choroby sítnice způsobené cukrovkou), otevření zadního pouzdra čočky atd. Všechny tyto operace lze pomocí laseru provádět s využitím optických vlastností očních struktur bez dříve nutného chirurgického zásahu do očních tkání. Operace jsou rychlé, méně bolestivé a většinu lze provádět i ambulantně. K očním operacím se dnes používá celá řada laserů. Prvně použitý laser rubínový byl při operacích sítnice nahrazen kvazikontinuálním laserem argonovým, pro operace tzv. sekundární katarakty – odstranění zadního pouzdra čočky se používá zpravidla vysokovýkonového Nd:YAG pulsního laseru, obr. 18, a pro úpravu očních vad (krátkozrakosti a dalekozrakosti) se uplatnil laser excimerový.



Obr. 18: Fotografie vysokovýkonového impulsního Nd:YAG laseru OFTALAS vyvinutého na ČVUT FJFI a používaného v oční mikrochirurgii

Díky rozvoji vláknové optiky a možnosti přenášení laserového záření optickými vlákny (využití laserových diod ve spojovací technice jako součást optoelektroniky) našly lasery uplatnění např. i v tzv. *angioplastice*, kde se pomocí záření provádí zprůchodňování uzavřených cév. Jsou rozpracovány další metody léčení např. srdečních chorob a nemocí zažívacího ústrojí; laser dnes také v některých případech nahrazuje klasickou zubní vrtačku – používá se na bezbolestné odstraňování zubních tkání. Další velkou oblastí je použití *fotodynamoterapeutických metod* založených na možnosti ničení pouze určitých (v tomto případě rakovinových) buněk optickým zářením – metoda léčení se nazývá *fotodynamická terapie*.

Velmi rozsáhlou oblastí se dnes stává využití tzv. měkkých laserů, tj. laserů s malým výkonem, obr. 19. Používají se k biostimulačním účinkům ve stomatologii, traumatologii a v dalších oborech.



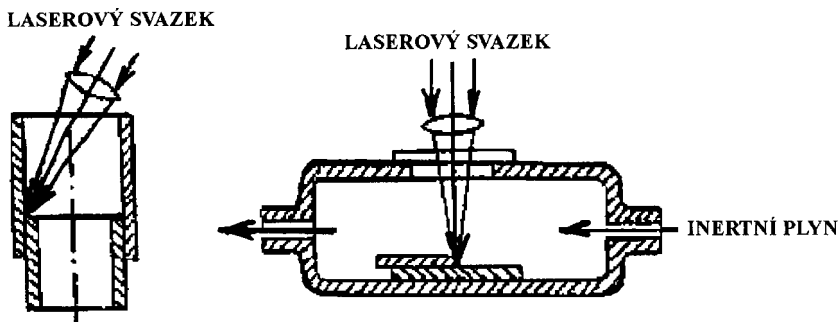
Obr. 19: Fotografie diodového terapeutického laseru firmy Lasotronic

Kromě terapeutických metod nacházejí lasery uplatnění i v diagnostice, kde je laserového záření (opět malého výkonu) využíváno k vyšetření oka, nebo tkání vnitřních orgánů (včasná diagnostika rakovinných nádorů).

Lasery v průmyslu

Do tohoto odvětví patří dnes mnoho nových oborů zahrnujících laserové svařování, vrtání, řezání (dekorace skla, rýhování, trimování), žhání, naprašování a další. 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, které klasickými metodami nelze provést.

Laserové sváření využívá optického záření k *roztavení* materiálu do požadované hloubky s minimálním odpařením povrchu. V praxi se v této aplikaci používají nejvíce kontinuálně běžící lasery s vlnovou délkou ležící v infračervené oblasti spektra CO_2 (vlnová délka $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) a Nd:YAG laser ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$). Svařování ve srovnání s dalšími aplikacemi vyžaduje menší intenzitu záření optického svazku a větší délku laserového impulsu (řádově ms). Výhodou sváření laserem je absence fyzického kontaktu s elektrodou, lokalizovaný ohřev a rychlé chladnutí, schopnost svářet různorodé materiály s různými geometrickými tvary, schopnost svářet součástky v ochranné atmosféře nebo zatavené uvnitř opticky transparentního materiálu, obr. 20. Laserovým svařováním se např. spojují hermetická pouzdra miniaturních relé, kardiostimulátory, kontakty v mikroelektronice, plechy v automobilovém nebo leteckém průmyslu.



Obr. 20: Příklady laserového svařování; v těžce dostupných místech (a), v inertní atmosféře (b)

Laserové vrtání je založeno na odstraňování materiálu *odpařováním*. Intenzita svazku musí být vyšší než v případě sváření, 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 vrtání využívá především Nd:YAG impulsního laseru. Předností laserového vrtání je vytváření velmi malých otvorů o průměru od 10 do 100 μm i v místech, kde je to pomocí jiných metod obtížné nebo dokonce nemožné.

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 opět kontinuální CO_2 lasery se středním výkonem do 15 kW. Ve většině průmyslových aplikací využívajících laserové řezání se přivádí koaxiálně s laserovým svazkem na místo řezání proud plynu. Pro řezání kovů jsou to 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. Výhodou laserového řezání je velká rychlost, řezání různých tvarů, obr. 21, možnost automatizace, bezkontaktní působení, dobrá kvalita řezu a malá zóna tepelného působení.



Obr. 21: Příklad vyřezávání součástek CO_2 -laserem

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.

Laserové značkování je založeno na místním odpaření materiálu na povrchu daného předmětu. 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. Další možností je pohyb svazku laserového záření po povrchu značkováného materiálu nebo pohyb značkováného předmětu. Znaky sloužící k identifikaci předmětů je možno nanášet na polovodičové, keramické a kovové povrchy, dále na papír, sklo, plasty, feritové elementy atd. Výška znaků je obvykle rovna zlomkům až jednotkám 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 (Nd:YAG laser, excimerové lasery). Předností laserového značkování je bezkontaktní zhotovování znaků a tím vyloučení případných deformací a napětí ve značkováném materiálu.

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. Těto metody se používá především v průmyslu pro tzv. transformační zpevňování některých namáhaných automobilových a leteckých součástí. Zdrojem záření je většinou opět kontinuální CO₂-laser tentokrát o výkonu několika tisíc wattů.

Lasery v mikroelektronice

Od počátku sedmdesátých let se začaly objevovat technologie jako *laserové dolaďování* jmenovitých hodnot odporů, kondenzátorů a elektrických filtrů, *odpojení* poškozených obvodů v polovodičových pamětech, *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. V těchto aplikacích se uplatňuje obvykle impulsní Nd:YAG laser s délkou impulsu v oblasti stovek nanosekund (tj. 10^{-9} s).

Dále se pro mikroelektroniku rozvíjejí 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 z povrchu materiálu, iniciován růst křemíku na izolační vrstvě SiO₂ 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, feroelektrické a feromagnetické vrstvy a vícevrstvé struktury [1]. Z vrstev jsou zhotovovány například nové druhy nedestruktivních pamětí, supravodivé kvantové magnetometry atd.

Laser v astronomii, geodézii a geofyzice

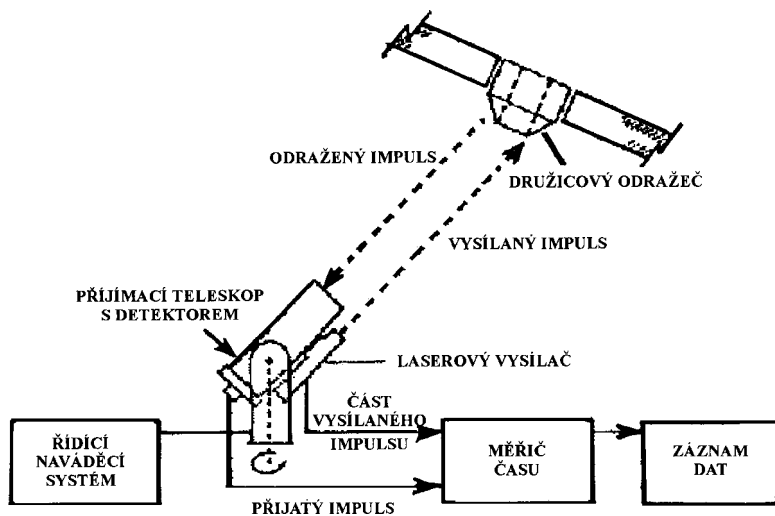
Velmi brzy po uvedení laseru do provozu byl laser použit také v systému radaru jako vysílač záření. V tomto případě se z charakteristik laserového záření využívá především jeho malá rozbíhavost (divergence) a dále schopnost generace velmi krátkých impulsů (řádově 10^{-12} s). Pomocí tohoto tzv. laserového radaru, obr. 22, 23, 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 umísťují tzv. **laserové družicové odražeče** – koutové hranoly, jejichž charakteristickou vlastností je, že odrážejí přicházející záření do zpětného směru. Podle využití laserového radaru (v astronomii, geodézii, geofyzice nebo ekologii) se tyto odražeče umísťují na pozemní cíle, družice nebo na povrch Měsíce (viz násl. kap.). 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*. Z této rovnice vyplývá, že **velikost přijímaného signálu se zmenšuje úměrně čtvrté mocnině vzdálenosti**. Dosah laserového radaru je do 20 km při měření pozemních objektů, oblačnosti, letadel apod. (tj. většinou objektů bez laserových odražečů – viz Lidar v dalším odstavci). Vzdálenosti 10 000 km jsou dosahovány při měření umělých družic Země a nejvzdálenějším objektem měřeným laserovým radarem jsou laserové odražeče umístěné na povrchu Měsíce (asi 380 tisíc km). Přesnost měření vzdálenosti laserovým radarem je dána délkou vysílaného impulsu, 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 vzdálenosti 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. Vyhodnocením dlouhodobých laserových družicových měření byl určen tvar zemského geoidu s přesností na 10 cm (uplatnění v *geodézii*).

V *geofyzice* umožnila laserová měření určit vzájemný pohyb částí pevnin (vzájemný pohyb kontinentů dosahuje rychlosti 4 až 5 cm za rok). Výsledky těchto měření jsou významné také pro *seizmologii*. Jako laserové vysíláče se v laserových radarech používají impulsní pevnolátkové lasery. Původně používaný rubínový laser (délka vysílaného impulsu je desítky nanosekund, tj. řádově 10^{-8} s) byl nahrazen Nd:YAG laserem s délkou impulsu o tři řády menší (desítky pikosekund, tj. 10^{-11} s) a nově pro velmi přesná měření – laserovým systémem titan safirovým s délkou impulsu v oblasti femtosekund (10^{-15} s).

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



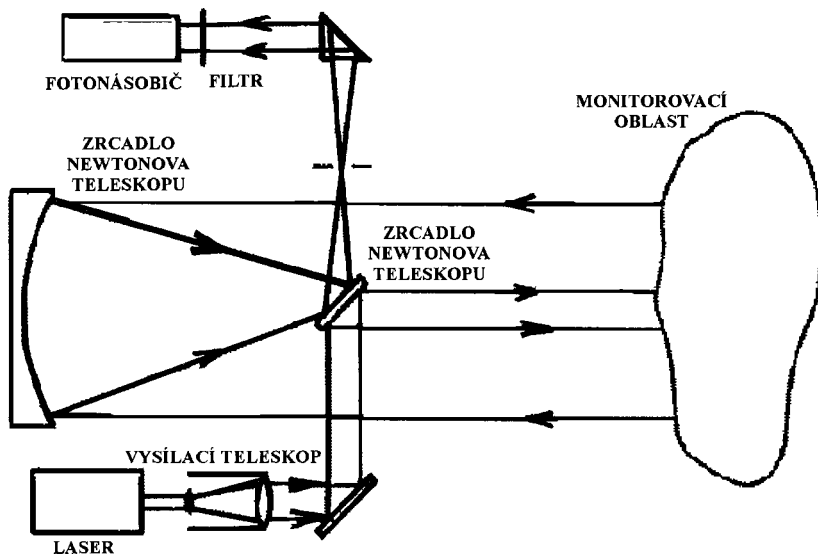
Obr. 22: Schematické znázornění měření vzdáleností umělých družic Země

Laserový radar v ekologii - LIDAR

Pozemní laserové radary, obr. 24, se používají v *ekologii* k měření znečištění ovzduší nebo v *meteorologii*. **K měření se zde využívá nejen odrazu, ale i rozptylu.** Vyslaný laserový impuls je při průchodu atmosférou rozptylován přítomnými molekulami a aerosoly – vzniká Mieův, Rayleighův nebo Ramanův rozptyl. Část záření rozptýleného ve zpětném směru je soustředována teleskopem a za speciálním filtrem detekována fotodetektorem. Přijatý signál, jehož amplituda je v každém okamžiku úměrná intenzitě rozptýleného záření, je zaznamenáván jako funkce času, což umožní určit vzdálenost rozptylujícího útvaru; šířka použitého filtru, případně připojený spektrometr určuje spektrum přijatého signálu. 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.



Obr. 23:
Měření vzdálenosti k umělé družici LAGEOS (Laser GEOdynamics Satellite) pomocí Nd:YAG pulsního laseru s konverzí vlnové délky z infračervené na zelenou.

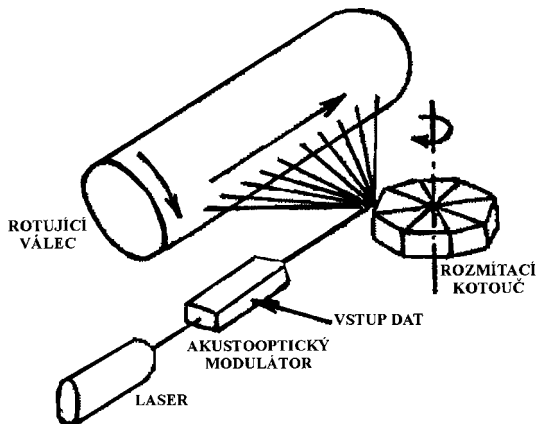


Obr. 24: Principiální schéma lidaru s koaxiálním vysílačem a přijímačem; L – laser, VT – vysílačí teleskop, Z1, Z2 – zrcadla Newtonova teleskopu, M – monitorovaná oblast, F – filtr, FN – fotonásobič

Laser ve výpočetní technice

Pro tuto aplikaci se využívají z důvodu malých rozměrů především polovodičové nebo He-Ne nízkovýkonové lasery. Do oblasti výpočetní techniky patří 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, obr. 25. Každá ploška na obvodu kotouče rozmítá svazek po celé délce válce. Válec je pokryt vrstvou fotocitlivého materiálu, který má tu vlastnost, že po dopadu laserového záření se v ozářeném bodě zmenší elektrický odpor materiálu až o několik řádů. Je-li tato vrstva nabitá před záznamem informace na konstantní potenciál, 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 elektrostatičticky nanášeno tónovací médium, jehož přilnavost k válci je dána hodnotou potenciálu v jednotlivých

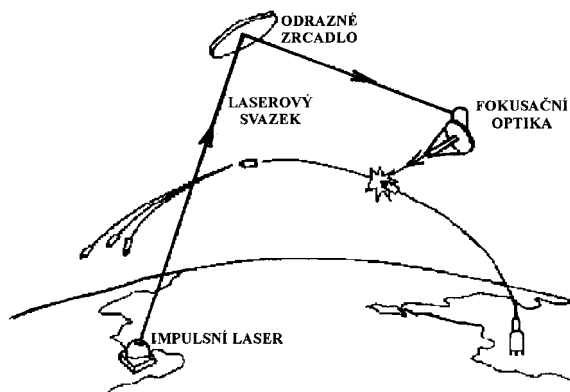
bodech. Obrázek z válce je přenášen na papír. Výhodou tohoto typu tiskárny je možnost dosažení kvalitního záznamu při vysoké rozlišitelnosti znaků a velkých rychlostech tisku (až desítky stran formátu A4 za minutu).



Obr. 25: Princip laserové tiskárny; L – laser, M – akustooptický modulátor, D – vstup dat, K – rozmitací kotouč, V – rotující váleček; šipky ukazují smysl rotace válce, rozmitacího kotouče a směr rozmítání svazku na válci

Vojenské aplikace laserů

Tyto aplikace zasahují do různých oblastí vojenské činnosti. K nejrozšířenějším patří tzv. **laserové dálkoměry** (obdoba pozemního laserového radaru) umožňující přesným změřením vzdálenosti cíle stanovit optimální trajektorii ničící střely a zvýšit tak spolehlivost zásahu. Pro tyto účely se využívají obvykle impulsní Nd:YAG laserové systémy. Daleko jednodušší jsou **laserové označovače**, používané např. už i v pistolích, které umožňují na vzdálenost do 20 m označit objekt zásahu. Pro tyto účely jsou vhodné malé diodové lasery. Naopak ničení mezikontinentálních balistických raket předpokládá použití vysokovýkonového laseru (CO₂ nebo chemických laserů) a zrcadel umístěných v kosmickém prostoru, obr. 26. Odtud je svazek přenášen vzhledem k minimálnímu útlumu signálu v prostoru mimo zemskou atmosféru prakticky beze ztrát na další zrcadlo, které svazek zfokusuje a zaměří na cíl, příp. raketu. Zrcadla jsou natáčena v souladu s údaji o letící raketě tak, aby bylo docíleno spolehlivého zásahu. Laser může být umístěn buď na pozemní stanici, nebo rovněž na oběžné dráze.



Obr. 26: Ničení mezikontinentálních balistických raket laserem (I – impulsní laser, OZ – odrazné zrcadlo, FO – fokusační optika, LS – laserový svazek)

Závěr

V přehledu je uvedena podrobněji pouze část aplikací, kde se laser v současné době používá. Z rozpracovaných technik jsou dále odvozovány další, např. u **laserového dálkoměru** se předpokládá využití v automobilech budoucnosti, kde zabudovaný **laserový radar** ve spojení s automatikou nedovolí řidiči přiblížit se k jinému vozidlu na vzdálenost menší, než je vzdálenost bezpečná; spektrálně definovaná interakce laserového záření s látkami se využívá v restaurátorství k odstraňování nečistot na starých obrazech a sochách, ale také při běžném čištění vnějších plášťů lodí nebo letadel; pomocí laserového záření zhotovené hologramy umožňují určit vady materiálu, atd. Už z výše uvedeného výčtu je zřejmé, že využití laserového záření je velmi rozsáhlé. U každé aplikace je ovšem vždy nutné zvažovat výhody použití této techniky ve srovnání s jejími nevýhodami, ke kterým patří (kromě laserových ukazovátek osazených laserovými diodami) vysoká cena, nutnost kvalifikované obsluhy a převážně nízký koeficient účinnosti laserových systémů (z toho vyplývající značná energetická náročnost). Je tedy nutno volit v každém jednotlivém případě zvlášť a určovat, kdy je použití laseru podstatným přínosem z hlediska samotného výkonu nebo ekonomického zhodnocení. Přesto platí, že využití laserů je v některých případech dnes už nezastupitelné a výzkum v aplikacích pokračuje dále.

Literatura:

- [1] Jelínek, M. – Klumber, Z.: Tenké supravodivé vrstvy. In: Věda a technika mládeži, 1991, č. 10, s. 41-43.