

Lasery

História objavu laserov

V roku 1960 zostrojil Teodor Maiman prvý rubínový laser. Za objavenie princípu lasera vyznamenali v roku 1964 v Štokholme Rusov Nikolaja G. Basova a Alexandra M. Prochorova spolu s Američanom Charlesom H. Townesom /obr.č.1/.



Obr. 1

Otcovia lasera -
N. Basov, A. Prochorov, CH. A. Townesom

Fyzikálny princíp laserov

Laser /Light Amplification Stimulated Emission Radiation/ je zdroj lúča koherentnej elektromagnetickej energie s vysokou intenzitou žiarenia. Záujem o laserové žiarenie plyní z unikátnych vlastností laserového svetla. Sú nimi :

- energia a výkon v úzkom vyžarovacom zväzku
- monochromatickosť
- koherencia
- kolimovanosť

Tieto vlastnosti umožňujú oproti pôvodným zdrojom svetla lepšiu presnosť zásahu. A tiež väčší účinok daný mnohonásobným výkonom laserového žiarenia. Ďalšími vlastnosťami sú :

- malá rozbiehavosť/divergencia/ laserového svetla,
- vysoká svetelná intenzita

Kým si povieme podstatu funkcie jednotlivých laserov, ktoré našli uplatnenie nielen v medicíne, pripomenieme si princíp generovania laserovým lúčom: Laserujúcim prostredím môže byť pevná, plynná, kvapalná látka. Tá prijme zvnútra dodanú energiu - napr. elektrickú, chemickú či svetelnú. Atómy alebo molekuly laserového prostredia sa tak nabudia na hornú laserovú energetickú hladinu. Nutnou podmienkou je, aby vybudené častice na tejto hladine určitú dobu zotrvali a aby ich koncentrácia bola väčšia než koncentrácia nevybudených /hovorí sa tomu inverzné obsadenie hladín/. Laserujúce prostredie je umiestnené v optickom rezonátore, v ktorom sa v krátkom čase v dôsledku **spontánnej (samovoľnej)** emisie žiarenia vytvorí stojaté vlnenie. Pôsobením tohoto vlnenia dôjde k uvoľneniu nazhromaždenej energie v atónoch či molekulách laserového prostredia - **stimulovanej emisii** a vyžiari sa intenzívny svetelný impulz. Po vyžiarení impulzu sa atómy a molekuly vrátia na dolnú energetickú hladinu. Podľa toho aké laserujúce prostredie majú jednotlivé lasery ich delíme na:

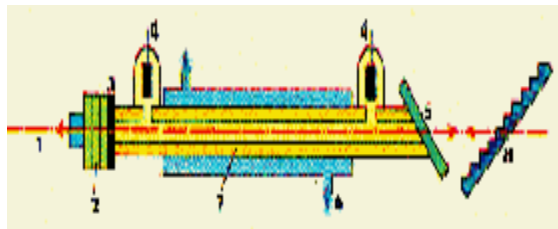
1. lasery s pevným laserovým prostredím
2. lasery s kvapalným laserovým prostredím
3. lasery s plynným laserovým prostredím

Lasery s pevným laserovým prostredím

Lasery s pevným laserovým prostredím v prípade rubínového lasera je monokryštál rubínu/ Al_2O_3 /, kde niektoré ióny Al^{3+} sú nahradené iónmi Cr^{3+} . Laserové hladiny sú hladiny iónu Cr^{3+} v mriežke Al_2O_3 . Energia z vnútra je dodaná buď vo forme intenzívnych svetelných zábleskov z xenónových výbojok, pokiaľ laser pracuje v impulzovom režime, alebo vo forme spojitého ultrafialového žiarenia z vysokotlakových ortuťových výbojok. Veľkosť rubínového monokryštálu býva 5 až 10mm v priemere a 5 až 20cm v dĺžke. V impulznom režime sa dá dosiahnuť výkon rádovo 10 MW v impulze o dĺžke 10ns. Vlnová dĺžka generovaného žiarenia rubínového lasera je 0,694 mm /červené svetlo/.

Neodymový laser je najpopulárnejší typ laserov, ktoré majú laserové prostredie pevnú látku. Laserovým prostredím je buď kryštál $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, kde niektoré ióny Y^{3+} sú nahradené iónmi Nd^{3+} /označujeme ho značkou YAG, z anglického názvu yttrium aluminum garnet/. No prostredie môže tvoriť aj sklo, ktoré je dopované iónmi Nd^{3+} . Laser Nd: YAG pracuje buď v spojitom režime, alebo impulzovom režime. V spojitom režime je budený svetlom vysokotlakových kryptónových výbojok a v impulzovom režime je budený intenzívnymi zábleskami xenónových výbojok. Rozmery kryštálu Nd: YAG sú podobné ako pri rubínovom lasery. V spojitom režime sa dá dosiahnuť z jedného laserového stupňa výkon až 150W, v impulzovom režime okolo 10MW, pri dĺžke impulzu približne 10ns. Tento typ lasera má spolu s CO_2 -lasery v chirurgii hlavné slovo. Vlnová dĺžka žiarenia neodymových laserov je 1,06mm /infračervené žiarenie/.

Lasery s plynným laserovým prostredím



CO_2 -laser je označenie pre plynný laser, kde laserovým prostredím je zmes plynov CO_2 , N_2 a He. Sklenená trubica je naplnená uvedenou zmesou plynov, kde horí tlejivý elektrický výboj. Elektróny vznikajúce vo výboji budia molekuly oxidu uhličitého na hornú laserovú hladinu. Molekuly dusíka sú budené tiež pri zrážkach s elektrónmi a svoju energiu tak pri nasledovných zrážkach prenesú na molekuly CO_2 . Tým sa zvyšuje koncentrácia molekúl vybudených na hornú laserovú hladinu. Do zmesi sa pridáva kvôli chladeniu hélum. Ľahké atómy hélia prijímajú pri zrážkach kinetickú energiu neutrálnych častíc a odovzdávajú ju stenám výbojky, ktoré sú chladené pretekajúcou vodou. Nízka teplota zmesi je pre laserový efekt podstatná, pretože inverzné obsadenie laserových hladín je väčšie. Rozmery laserovej trubice pri nízko výkonnom systéme sú cca 1m dĺžka a 5 až 10mm priemer. V medicíne sa používajú CO_2 -lasery s maximálnym výkonom do 100W. Vlnová dĺžka žiarenia tohoto lasera je 10,6mm /infračervené žiarenie/. Na obrázku č.2 je popis priemyselne vyrábaného vlnovodového CO_2 -lasera: 1- laserový lúč, 2- piezoelektrický prvok pre jemnú reguláciu dĺžky optického rezonátora, 3- polopriepustné zrkadlo, 4- elektródy, 5- Brewsterové okienko, 6- vodné chladenie, 7- dielektrický vlnovod, 8- odrazná mriežka – pre výber dĺžky žiarenia / spolu s polopriepustným zrkadlom tvoria optický rezonátor/.

Laser argónový a laser hélium-neónový našli uplatnenie predovšetkým v očnom lekárstve. Sú to opäť lasery s plynným aktívnym prostredím, v ktorom horí výboj. K vybudeniu na hornú laserovú hladinu sú potrebné nasledovné zrážky s elektrónmi: prvá zrážka ionizuje atóm argónu a druhá tento vzniknutý ión Ar^+ vybudí na uvedenú hladinu. Kvôli tomu je potrebná vysoká hustota elektrického prúdu. Nepriaznivý dôsledok toho je, že celý systém sa dosť silno zahrieva. Výbojová trubica sa preto vyrába z materiálu, ktorý účinne odvádza teplo. Takýmto materiálom je napríklad oxid berýlia alebo grafit. Argónový laser dáva pomerne veľké výkony až desiatky či stovky wattov. Žiarenie môže obsahovať i viac vlnových dĺžok. Najintenzívnejšie spektrálne čiary sú 0,488mm /modrá/ a 0,515mm /zelená/. Laserová reakcia v hélium-neónovom lasery sa deje medzi energetickými hladinami atómu neónu. V zrážke s elektrónmi vo výboji dostáva neónový atóm dostatočnú energiu pre presun na hornú laserovú energetickú hladinu. K tomu tiež prispievajú atómy hélia. Výboj horí v sklenených trubiciach. Typický výkon napr. z valcového výboja 100cm \times 6mm je 100mW. Vlnová dĺžka generovaného žiarenia je najčastejšie 0,633mm/červené svetlo/. Tento laser sa často používa aj ako "navádzač" - doprovodný viditeľný lúč pre lúče iných laserov.

Excimerový laser: je laser, ktorého častice nie sú molekuly tvorené rovnakými atómami, ale molekuly vzniknuté spojením dvoch atómov rôznych vzácnych plynov, alebo spojením atómu vzácneho plynu a halogénového prvku/napr. argón a kryptón, kryptón a fluór, xenón a chlór.../. Tieto molekuly vzniknú pri zrážkach s vysokoenergetickým elektrónovým zväzkom. Existujú len vo vzbudenom stave. Pri vyžiarení fotónu prejde molekula do základného stavu a okamžite sa rozpadne. Laserový prechod je dosť široký, preto možno laser preladovať. Vlnové dĺžky žiarenia tohoto lasera ležia v ultrafialovej oblasti. Priemerný výkon v pulznom režime napr. KrF lasera môže byť 100W.

Lasery s kvapalným laserovým prostredím

Posledným typom lasera je farebný laser. Laserujúcim prostredím je kvapalina: roztok zlúčeniny organického farbiva v etylalkohole, metylalkohole alebo vode. Takýmto farbivom môže byť napr. kumarin alebo rodamin. Budenie laserovej kvapaliny sa deje ožiarením buď viditeľným alebo ultrafialovým svetlom. Po ožiarení vydáva kvapalina fluorescenčné svetlo s mnohými vlnovými dĺžkami, na ktoré možno laser preladovať zmenou dĺžky rezonátora. Výkon farebného lasera môže dosiahnuť aj 100W. Vlnová dĺžka je daná typom farbiva. Pohybuje sa od 0,4mm až do 1mm. To znamená, že k dispozícii je viac než celé spektrum viditeľného svetla.

Uplatnenie laserov

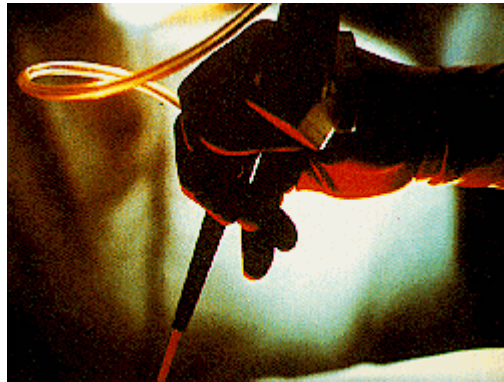
Najväčšie uplatnenie laserov je v :

- medicíne: oftalmológii, dermatológii, plastickej chirurgii, neurochirurgii, otorinolaryngológii, urológii, gynekológii, stomatológii,
- kozmológii,
- vláknovej optike,
- spektroskopii,
- atómovej fyzike atď..

Využitie laserov v medicíne

krát v ľudskej chirurgii použil v roku 1972. Najväčšie spektrum aplikácii má CO₂-laser. V čom je tento laser výnimočný? Rez laserovým lúčom je tenký, naviac okolité tkanivo je žiarením zasiahnuté len do hĺbky cca 0,1mm. Žiarenie o vlnovej dĺžke okolo 10mm je tkanivom silne pohlcované. Pretože voda tvorí 75% až 95% tkaniva. Ďalšia výhoda je, že tkanivo

sa reže bez dotyku rezného prístroja /bez tlaku/. A ešte jednu prednosť tohoto "laserového skalpela" treba uviesť: pri hustote energie žiarenia okolo $400\text{J}/\text{cm}^2$ sú konce ciev pri reze fotoagulované /zvarené/, takže rána menej krváca. Takýmto spôsobom je možné uzavrieť cievu až o priemere niekoľko milimetrov. Na fotoaguláciu sa hodí aj neodýmový laser.



Obr. 3

Laser sa používa aj k liečeniu hnisavých ochorení. Uplatňujú sa mnohé výhody: reže, odparuje tkanivá, zatavuje krvné cievky a sterilizuje oblasť. Veľmi úspešne bol použitý v brušnej dutine, k preventívnej sterilizácii poranených brušných stien.

CO_2 - lasery s nižším výkonom do /16 W/ sa používajú ako "skalpel" /obr.č.3/. Na priemer 0,5 mm sa dá dosiahnuť rezacia rýchlosť 5 mm/s. Používajú sa aj lasery stredných výkonov až 35 W a veľké chirurgické CO_2 lasery a majú výkon od 35 W do 100 W.

Svoje uplatnenie našli aj v neurochirurgii. Prednosti spočívajú v bezdotykovej operácii, minimálne tepelné poškodenie okolitého tkaniva vďaka silnej absorpcii v bunkovej a medzibunkovej vode, presnosť rezu, menší čas dotovania pacienta. Laser umožnil aj operácie v nedostupných miestach ako napríklad v mozgu a mieche. Pacienti sú spokojní, lebo odtok aj strata krvi sú menšie, menšia je aj pooperačná jazva a skraca sa pobyt v nemocnici i následovná rekonvalescencia.

Jedným z posledných lekárskejších odvetví kam až CO_2 - laser prenikol je stomatológia. Laserový lúč sa používa na odparenie poškodenej zubnej skloviny, ktorá veľmi silne absorbuje žiarenie tohto lasera. Pre tieto aplikácie sa laser prevádzkuje v pulznom režime napr. s frekvenciou 1Hz a výkonom 4W, aby sa stačilo odvádzať absorbované teplo. Rovnakým problémom zostáva vhodné nastavenie optimálnych parametrov lasera.

Doteraz som stále písali len o výhodách. Ale čo nevýhody? Samozrejme aj tie sú. Jednou z nich je, že nie je komerčne dostupný kvalitný vlnovod CO_2 -lasera pre infračervené žiarenie /10.6mm/. Vlnovod by umožňoval operatívne premiestňovanie lúča na určené miesto. Zatiaľ sa vedenie lúča umožňuje artikulačným ramenom. Je zložené z niekoľkých častí a materiál sú hliníkové a uhlíkové vlákna, ktoré umožňujú veľký pohyb v priestore. Zalomenie lúča sa deje pomocou odrazových zrkadiel. Má to veľkú nevýhodu: nepohodlné ovládanie, straty žiarenia pri odraze na 7 až 8 zrkadlách. V artikulačnom ramene je okrem infračerveného lúča aj červený navádzací lúč hélia-neónového lasera. Pre úplnosť ešte treba uviesť, že existujú tzv. vlnovodové CO_2 -lasery / obr.č2/, kde výboj horí pri vyššom tlaku pracovnej zmesi plynov./ CO_2 , N_2 , a H_2 /. Tieto lasery sú umiestnené v keramickej ceruzke o priemere 2-3mm a dĺžke 10 až 20cm. A tak odpadávajú problémy s artikulačným ramenom. Výkon takéhoto lasera neprekračuje 10W.

Túto uvedenú nevýhodu však nemajú lasery argónové a neodýmové, lebo ich žiarenie je možné viesť ohybnými kremennými vlnovodmi. Obidva lasery sa používajú v očnom

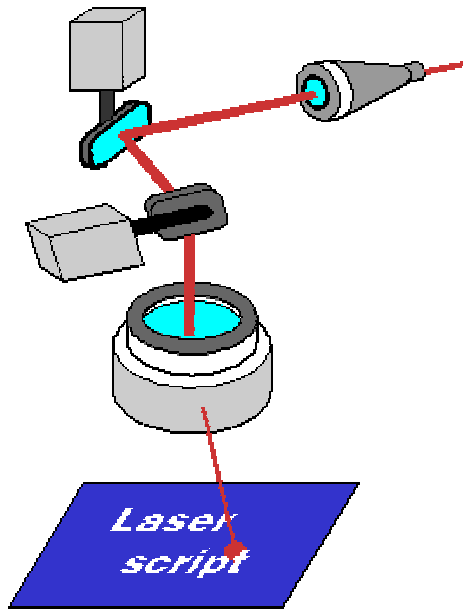
lekárstve. Viac sa využíva argónový s výkonom 5 až 10 W, ktorého žiarenie sa krvou silno pohlcuje, takže dochádza už k spomínanej fotoagulácii malých cievok a kože. Tým sa zastaví krvácanie na sietnici, či nadbytočný rast ciev pri cukrovke.

Využitie laserov v kozmológii

Unikátne vlastnosti laserov sa využívajú aj v mnohých oblastiach výskumu kozmu a pri skúmaní Zeme z kozmu. Len niekoľko rokov po objave lasera bol rubínový laser využitý ku konštrukcii laserového diaľkomeru pre meranie veľkých kozmických vzdialeností. Laserový diaľkometer pracuje na klasickom radarovom princípe: meria sa čas, ktorý uplynie od okamihu vyslania krátkeho impulzu do okamihu príchodu impulzu odrazeného od meraného objektu. Z toho času, pri uvážení rýchlosti a spôsobu šírenia svetla, je možné určiť meranú vzdialenosť. Veľkú vzdialenosť je možné merať len vtedy, keď sú na meranom objekte umiestnené špeciálne kútové odražače. Oni odrážajú dopadajúci svetelný zväzok späť v rovnakom smere. Od 60-tych rokov boli na rôzne obežné dráhy okolo Zeme vypustené družice vybavené kútovými odražačmi. Prvý kozmonaut, ktorý vstúpil na Mesiac, inštaloval na jeho povrchu panel týchto odražačov. Presnosť merania vzdialeností umelých družíc a Mesiaca sa postupne zvyšuje od počiatkovej hodnoty niekoľko metrov až na hodnoty niekoľko málo centimetrov pri meraní Mesiaca a na milimetre pri meraní družíc. V súčasnosti pracuje na Zemi sieť niekoľko desiatok laserových družicových diaľkometerov, ktoré merajú opakovane vzdialenosti družíc s vysokou presnosťou. Namerané výsledky sú zhromažďované a spracovávané v dátových centrách NASA a Európskej kozmickej agentúre. Používajú v geodézii pre meranie veľkých vzdialeností s extrémnou presnosťou, v geofyzike, pri skúmaní deformácie a pohybu kontinentov, pri štúdiu gravitačného poľa Zeme, pre globálnu ekológiu, skúmanie oceánov a ľadovcov, v teoretickej fyzike pri štúdiu relativistických efektov. V 80-tych rokoch bola k Marsu vypustená sonda PHOBOS, ktorá mala skúmať aj mesiac Phobos s pomocou laserom budeného iónového spektrometra. Koncom storočia poletí k Marsu niekoľko sond nového typu ku komplexnému skúmaniu planéty. Sondy sú skonštruované na základe širokej medzinárodnej spolupráce. Budú vypustené ruskou nosnou raketou. V blízkosti Marsu sa rozdelia na niekoľko častí. Jedna časť bude uvedená na obežnú dráhu okolo Marsu, ďalšia pristane na povrchu a vysadí automatické vozidlo, časť sa bude pohybovať za pomoci balónu v riedkej atmosfére planéty. Pre balónovú sondu bol vyvinutý miniatúrny laserový výškomer, ktorý bude merať výšku balónu nad povrchom planéty. Poznatky získané pri riešení úloh kozmického výskumu sa využívajú i pri riešení úloh "pozemských". Prístroj pre skúmanie atmosféry Marsu bol upravený a je používaný na meranie znečistenia atmosféry v ekológii.

Čo sa dá s lasermi ešte robiť?

Laserom môžeme odpariť tenké farebné náparty na skle aj iných materiáloch /obr.č.5/. Rezanie dreva, hologramov, plexiskla sa môže kombinovať s gravírovaním. Laserom môžeme vyrezávať šablony, ktoré sú z ocele gumy, fosforbronz. Laser sa využíva aj pri nukleárných fúziách



Princíp vychýľovania

Behom značenia laserom je sväzok lasera vychýľovaný zrkadlami vychýľovacieho systému a sústredený F-theta objektívom na popisovaný povrch. Koncentrovaný laserový sväzok vytvára popis vyrytím, zmenou farvy, alebo odparením povrchu.

Celý proces vychýľovania a značenia je riadený počítačom. Nové grafické užívateľské rozhranie pod systémom Windows umožňuje jednoduchý návrh a veľkú flexibilitu celého systému. Dajú sa priamo používať TTF fonty (viac než 750 druhov písma) alebo importovať predlohy z grafických programov typu CorelDraw, AutoCad, a iné. Tvorba a značenie ľubovoľných obrázkov, firemných log, nápisov, čiarových kódov, číslovania je už len hračkou.

Využitie laserov v atómovej fyzike

Žiarenie, ktoré prijímajú atómy alebo molekuly, je už mnoho rokov cenným zdrojom informácií o štruktúre mikrosvetu. Viedlo to až k vzniku kvantovej teórie. Táto disciplína umožňuje popísať chovanie a vlastnosti najmenších štruktúr hmoty/molekúl, atómov až kvarkov/. Otto Frisch v roku 1933 bol asi prvým, komu sa podarilo svetlom so sodíkovej výbojky odkloniť sväzok sodíkových atómov, a tak demonštrovať mechanické účinky svetla na malé objekty. V dnešnej dobe sa používajú ako zdroje žiarenia lasery a atómy dokážeme nielen odkloniť, ale aj spomaliť /čo znamená schlaďiť, lebo teplota plynu je daná rýchlosťou atómu alebo molekúl / a dokonca aj chytiť do svetelnej paste.

Príklady najrozšírenejších aplikácií

Prvé experimenty s laserovým chladením boli prevedené na iónoch Winelandom a Dehmptom/1975/, ale v rovnakej dobe bol Hanshom a Schawlowom navrhnutý spôsob ako schlaďiť aj atómy. Najjednoduchšia metóda nazývaná Dopplerovo chladenie využíva rozptyl fotónov na atónoch šíriacich sa proti laserovému lúču. Žiarenie z lasera je tvorené mnohými fotónmi a každý z nich má hybnosť rovnú h/λ / h - Planková konštanta a λ - vlnová dĺžka žiarenia/. Každý absorbovaný fotón udelí atómu malý kopanec v smere šírenia žiarenia. Absorbovaný fotón spôsobí nabudenie/excitáciu/ atómu. Po krátkej dobe /cca 10^{-9} / sa atóm získanej energie zbaví Vyžiari fotón, ale v ľubovoľnom smere. Smery vyžiarených fotónov budú rozličné, preto výsledná sila, ktorá ovplyvňuje pohyb atómov, bude v smere absorbovaných fotónov. V tomto prípade proti pohybu atómov, ktoré sa

tak budú spomaľovať. Môže nastať aj prípad, keď na atóm svietime z dvoch protíľahých strán intenzívnymi laserovými zväzkami. Fyzici si tiež posvietili na atómy troma pármí navzájom kolmých protibežných zväzkov a dostali usporiadanie, ktoré umožňovalo chladiť atómy zo všetkých strán, tak že zostali prilepené v priesečníku zväzkov. Takéto usporiadanie nazvali "optický sirup" Pri Dopplerovom chladení sa dosiahlo teplôt 240mK pre sodík a 125mK pre cézium. Optické sirupy sa nechovali presne podľa očakávania. Snaživé merania vedcov v NIST/National institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA/ odhalili, že je možné dosiahnuť teplôt až o jeden rád menších, než predpovedala predchádzajúca teória chladenia, pokiaľ sa odieni magnetické pole Zeme. Ide o takzvaný Zeemanov jav a typ chladenia sa nazýva supdopplerovské chladenie. U chytených atómoch sa ich rýchlosti v pasti prevádzajú na teploty, napr. pri atómoch Cs bola nameraná rýchlosť 12,5mm/, čo odpovedá 2,5 milióntine Kelvina/teoreticky najnižšia teplota 0K odpovedá -273K/. Pre porovnanie: pri pokojovej teplote 300K majú rýchlosti rádovo stovky m/s. So získavaním zručností bolo jasné, že publikované teórie sa dajú dobre použiť v jednodimenzionálnych najviac dvojdimenzionálnych problémoch. Walter v roku 1990 popísal tri typy chovania sa atómov v trojdimenzionálnej pasti.

Použitá literatúra:

[1] kekule.science.upjs.sk