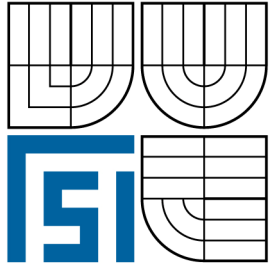




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA A VYUŽITÍ LASERU PŘI OBRÁBĚNÍ
ANALYSIS OF LASER USAGE IN MACHINING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PETR KAVAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. OSKAR ZEMČÍK, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Kavan

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Analýza a využití laseru při obrábění.

v anglickém jazyce:

Analysis of laser usage in machining technology.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Rešerše literatury k danému tématu.
2. Používaná zařízení, princip, podmínky použití.
3. Porovnání s konvenčními metodami obrábění.
4. Vyhodnocení a závěr.

Cíle bakalářské práce:

Přehled, zařízení, podmínky použití světelného paprsku při obrábění. Porovnání s konvenčními způsoby obrábění.

Seznam odborné literatury:

1. ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
2. ZEMČÍK, O. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6
3. KÖNIG, W. Fertigungsverfahren band 1, 2, 3, 4, 5, 6. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI – Verlag GmbH, 1999. 416 s. ISBN 3-18-401054-6
4. Firemní podklady dle dalšího zpřesnění a určení (Sandvik Coromant, Gühring, Fette, Pramet, Mitsubishi, Iscar, Seco, apod.)
5. HÜGEL, H. Strahlwerkzeug Laser. Einführung. Stuttgart: B.G.Taubner, 1992. 357 s. ISBN 3-519-06134-1
6. REICHARD, A. Fertigungstechnik 1, 2. 10. Aufl. Hamburg: Handwerk und technik, 1993. 420 s. ISBN 3-582-02311-7

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Oskar Zemčík, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 10.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Základním cílem této bakalářské práce je analyzovat laser a jeho aplikace v oblasti strojírenství a to především v odvětví obrábění materiálů. Práce uvádí rozbor základních typů laseru a laserových systémů, jež jsou v dnešní průmyslové praxi využívány. Dále je potom rozebírána problematika interakce laserového paprsku s obráběným materiálem a v neposlední řadě práce analyzuje technologické procesy obrábění materiálů laserem, jež se ve strojírenství dnešní doby vyskytují nejhojněji. Autor se především zaměřuje na obecné a komplexní shrnutí daného problému.

Abstract

The main object of this bachelor's thesis is analyzing the laser and its application in mechanical engineering especially in material machining. The work introduces basic laser's types and laser's systems analysis used in current industrial profession. The problems of laser ray interaction with machined material are analysed and the most occurred technological processes in machining of material by laser in engineering in current time are analysed. The author is focused on general and complex summary of relevant problem firstly.

Klíčová slova

Laser, obrábění laserem, typy laserů, interakce laser-materiál, metody obrábění laserem, mikroobrábění, stimulovaná emise záření

Key words

Laser, laser machining, laser types, laser-material interaction, processes of laser machining, micromachining, stimulated emission of radiation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAVAN, P. Analýza a využití laseru při obrábění. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 88 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Analýza a využití laseru při obrábění“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 29.5.2009

.....
Jméno a příjmení bakaláře

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčikovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah	7
Úvod	9
1 Fyzikální princip laseru	10
1.1 Základní konstrukce laseru.....	10
1.2 Princip laseru na atomární úrovni.....	13
1.3 Přehled základních druhů laseru	16
1.3.1 Pevnolátkové lasery	18
1.3.1.1 Polovodičové lasery.....	19
1.3.2 Plynové lasery	20
1.3.3 Kapalinové lasery.....	21
1.3.4 Lasery využívající svazky nabitých částic	21
1.4 Interakce laserového paprsku s materiálem – základní pojmy	22
1.4.1 Parametry laserového paprsku	32
2 Využití laserů ve strojírenství	37
2.1 Rozbor laserů a laserových zařízení využívaných ve strojírenství	38
2.1.1 Průmyslové lasery	38
2.1.1.1 Plynové CO ₂ lasery.....	39
2.1.1.2 Plynové CO lasery	44
2.1.1.3 Pevnolátkové lasery.....	44
2.1.1.4 Diodové lasery	49
2.1.1.5 Excimerové lasery	50
2.1.2 Laserová zařízení a stroje s laserem.....	53
2.2 Laserové technologie	60
2.2.1 Řezání laserem	62
2.2.2 Svařování laserem	64
2.2.3 Vrtání laserem.....	67
2.2.4 Laserové značení, značkování a rýhování	69
2.2.5 Laserové gravírování (mikrofrézování).....	70
2.2.6 Laserové texturování.....	72
2.2.7 Laserové lštění povrchů	73
2.2.8 Tepelné zpracování materiálů laserem	74
2.2.9 Laserové nanášení ochranných a otěruvzdorných povlaků.....	75
2.2.10 Laserové soustružení	76
2.2.11 Laserové frézování	77
3 Porovnání s konvenčními metodami obrábění.....	78
4 Bezpečnostní rizika laseru.....	80
4.1 Obecné standardy	80
4.2 Škodlivost laserového paprsku.....	80
4.2.1 Poškození očí.....	81
4.2.2 Poškození kůže.....	82
4.2.3 Nebezpečí úrazu elektřinou.....	82
4.2.4 Nebezpečí výparů	82
4.3 Bezpečnostní třídy laseru	83

Závěr.....	84
Seznam použitých zdrojů.....	85
Seznam použitých zkratek a symbolů.....	88

ÚVOD

Rozhlédneme-li se kolem sebe, je zřejmé, že laser a laserové technologie v době 21. století jsou jeho naprosto běžnou a téměř neodmyslitelnou součástí. Jeho uplatnění, nejčastěji jako nástrojů, můžeme vidět v široké škále oblastí vědy, průmyslu, výtvarného umění, lékařství, astrologie, geodézie, metrologie, výpočetní techniky a mnoha dalších, ale také nás doprovází v každodenním životě ve formě čtecích zařízení mechanik CD přehrávačů či jednotek CD/DVD ROM v našich počítačích apod.

Jak známo, slovo laser je složeno z počátečních písmen anglických slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což je možno doslovně přeložit jako „zesílení světla stimulovanou emisí záření“. Právě jev stimulované emise záření stojí za jedním z největších objevů 20. století, jehož základy položil Albert Einstein již v roce 1917, který jako první teoreticky odůvodnil existenci elementárního procesu, při kterém záření o jisté frekvenci způsobí kvantový přechod elementárních částic jím prostupované látky, přičemž je vyzářeno nové kvantum energie (fotonu), jehož frekvence, směr šíření a polarizace jsou souhlasné s frekvencí přichozího záření. První laser však čekal na své zrození až do roku 1964, kdy Nobelovu cenu za jeho objev získali vědci Charles Hard Townes, Nikolaj Gennadijevič Bassov a Alexandr Nikolajevič Prochodiv.

Rozsah uplatnění laserů je až neuvěřitelný. Jsou užívány např. jako vynikající měřiče délek a času. Jsou schopny měřit čas s přesností až 10^{-15} s. Do doby objevu laseru byla mezinárodním standardem délky standardní metrová tyč. Nyní ji však nahradila vlnová délka daného světelného spektra. Zajímavostí je např. laserová aparatura LIGO používaná v americkém California Institute of Technology, kterou je měřena čtyřkilometrová vzdálenost s přesností 10^{-8} rozměru atomu.

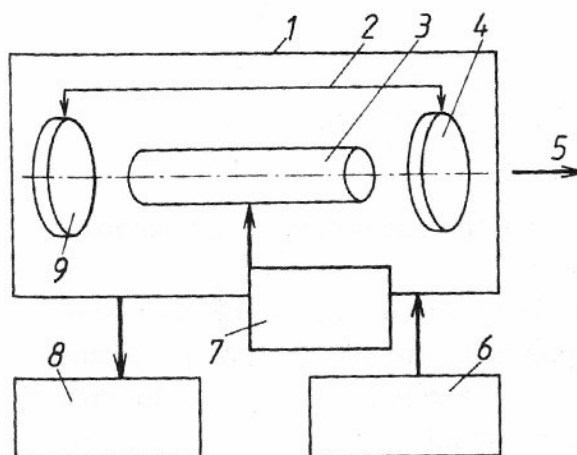
Velice časté uplatnění v dnešní době nacházejí lasery v procesech zpracování a obrábění materiálů jako výrobní nástroje. Oblibu si získaly díky svým schopnostem rychlého procesu obrábění, vysoké flexibility, minimální hlučnosti, bezkontaktního pracovního procesu, minimálního tepelného ovlivnění okolního materiálu a mnoha dalším. Díky vysokým výkonům, které jsou dnešní lasery schopny vyvinout a které dosahují hodnot kW, MW i TW, je možnost obrábění jakýchkoli materiálů. Díky neustálému pokroku vědy a techniky je laser společně s laserovými systémy průběžně zdokonalován a vyvíjen směrem k novým technickým možnostem, finanční efektivnosti jeho aplikací a jeho výroby samotné. Nejčastějšími aplikacemi laseru, které lze nalézt v oblasti technologické, jsou především svařování, řezání, vrtání, tepelné zpracování, povrchové úpravy, gravírování, značení, metody Rapid prototyping a v neposlední řadě laserová podpora konvenčního obrábění.

V této práci bude soustředěna pozornost především na obecný rozbor aplikace laseru a jeho systémů v oblasti strojírenství a komplexní popsání této problematiky. Majoritními „milníky“ této práce budou zavedení pojmu stimulovaná emise záření, popis laserového paprsku a jeho charakteristika, seznámení se s fyzikální podstatou interakce laser-materiál, rozbor laserů využívaných při obrábění materiálů, obeznámení se s možnostmi konstrukce laserových systémů, výčet a popis základních technologických laserových operací, porovnání s konvenčními metodami a možná rizika při manipulaci s laserem.

1. Fyzikální princip laseru

Dříve, než přistoupíme k podrobnému popisu funkce světelného paprsku v průmyslových aplikacích a to především ve strojírenství v odvětví obrábění materiálů, měli bychom si stručně přiblížit jeho fyzikální princip. Seznámení se s jeho podstatou nám v dalším textu alespoň částečně zjednoduší vnímání interakce paprsku s obráběnými materiály po stránce fyzikální. Abychom příliš neodbočovali od přesně daného cíle této rešeršní práce a vzhledem k tomu, že hlubší zkoumání a popisování této problematiky bychom měli přenechat osobám pověřenějším, spokojíme se s popisem světelného paprsku na strojírenské rozlišovací úrovni.

1.1 Základní konstrukce laseru



Obr. 1.1 Schéma zařízení pro obrábění laserem (1): 1) Laserová hlavička, 2) Rezonátor, 3) Laserové médium, 4) Polopropustné zrcadlo, 5) Výstup paprsku, 6) Zdroj energie buzení, 7) Budicí zařízení, 8) Chladicí systém, 9) Nepropustné zrcadlo

Každý laser je složen z následujících částí:

1) Laserová hlavička: Je pevný rám zařízení laseru obsahující jeho aktivní součásti viz. níže;

2) Optický rezonátor: Je tvořen nejméně dvěma zrcadly nejčastěji sférického charakteru a to v konfokálním stabilním či konfokálním nestabilním uspořádání (obr.1.2) (9), přičemž v prvním případě jedno z těchto zrcadel je zcela odrazivé a druhé polopropustné (častější), v druhém případě jsou nepropustná obě. Tato zrcadla jsou laserovým médiem vzájemně propojenými oscilátory, což má za následek vázané kmity, kde v důsledku zákona zachování energie přechází energie buzení z jednoho oscilátoru na druhý a naopak. Jinými slovy rozkmitáme-li první oscilátor, dojde vlivem vazby na druhý oscilátor k jeho tlumení, jeho energie vyvolaná budícím zařízením je předávána oscilátoru vázanému a naopak (částice

dodané do soustavy budícím zařízením se pohybují mezi zrcadly tam a zpět, dokud nezískají energii dostatečnou k průniku polopropustným zrcadlem). *Konstrukční uspořádání rezonátoru určuje vlastnosti paprsku (koherenci, intenzitu záření, jeho pravidelnost, spektrální a prostorové charakteristiky). Průměr a zakřivení zrcadel určují rozdělení intenzity záření a energetickou rozbíhavost laserového záření, tj. divergenci paprsku, která je dána rovinným nebo prostorovým úhlem, ve kterém se šíří (2).* Existují i lasery, u kterých záření stačí pouze jediný průchod laserovým médiem k získání potřebné energie. Tyto se nazývají superradiační a proto u nich není třeba rezonátoru;

3) Laserové médium: *Jedná se o směs několika materiálů s vhodnými energetickými hladinami ve vhodném nosném materiálu, který je průhledný a má schopnost odvádět teplo (2).* Tento průhledný nosný materiál může být tvořen kupříkladu skleněnou či plastovou trubicí. Směs vyskytující se v prostoru ohraničeném trubicí a oscilátory se nazývá aktivní prostředí (obr. 1.3). Je to prostředí (látka plynná, pevná či kapalná), v němž jsou obsaženy excitované (vybuzené) atomy do vyšších energetických hladin, ve kterých atom může setrvávat relativně dlouhou dobu (10^{-8} s a déle). To znamená, že látka aktivního prostředí je nasycená převážně atomy na vyšších energetických hladinách. *Nahromadí-li se na takové hladině atomy a pak postupně, nahodile, spontánně vyzařují, pozorujeme jev zvaný luminescence (11).* K tomu je však zapotřebí dodat energii v libovolné podobě.

Aktivní prostředí používaná v konstrukci laseru jsou:

- plynná;
- monokrystalická (pevná);
- polovodičová s p-n přechodem;
- organická barviva;
- polovodičové multivrstvy;
- volné elektrony a jiné.

4) Polopropustné zrcadlo: Je tabule skla pokrytá velice tenkou vrstvou kovu o tloušťce řádově několika μm . V optice je nazýváno děličem svazku. *Jeho účelem je rozdělit paprsek světla tak, aby část prošla přímo, zatímco druhá část je odražena (9).* Využívá se několika stupňů propustnosti tohoto prvku;

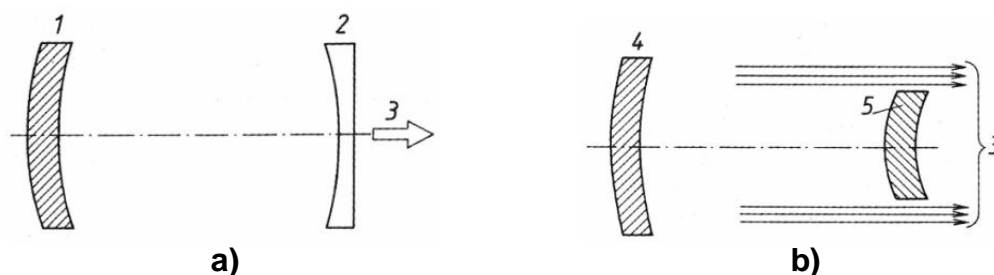
5) Výstup paprsku: Svazek světla (fotony vzniklé stimulovanou emisí záření viz níže.), který vlivem působení rezonátoru a aktivního prostředí získal potřebnou energii k průchodu polopropustným zrcadlem;

6) Zdroj energie buzení: Je speciálním druhem síťového napáječe dodávajícím do soustavy energii;

7) Budící zařízení: V dnešní době jsou známy lasery buzené světlem, elektrickým proudem, ultrazvukem, svazkem elektronů, chemické lasery etc. *Způsob buzení je dán laserovým médiem. Plynné médium je buzeno téměř vždy elektrickým výbojem, stejnosměrným nebo střídavým proudem. Pevné laserové médium je nejčastěji buzeno lampami (výbojkami) nebo diodami (2);*

8) Chladicí systém: Ne všechna energie dodaná do soustavy a energie v soustavě vznikající se přemění v záření. Značná část těchto energií se přemění v teplo, které je třeba pro správnou funkci laseru a především k prodloužení jeho životnosti ze soustavy odvádět. U laserů používaných při zpracování materiálů se nejčastěji používá chlazení vodou. Chladicí okruh má dvě větve: vnitřní (používá se deionizovaná voda) a vnější (voda z vodovodní sítě nebo ze speciálního zásobníku s čerpadlem). Výrobci laserových zařízení dodávají také speciální chladicí zařízení, u kterých je vnitřní okruh chlazen vzduchem (2). U méně výkonných laserů se používají nosné materiály mající vlastnost dobrého odvodu tepla a jsou chlazeny pouze vzduchem;

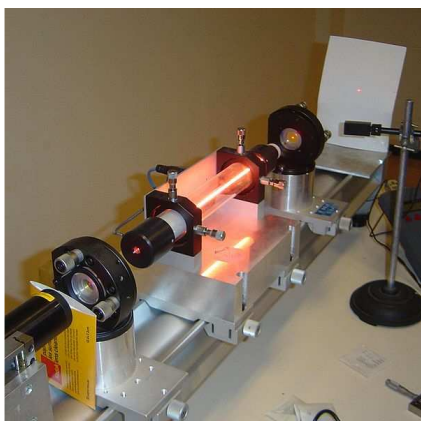
9) Nepropustné zrcadlo: Zcela odrazivé zrcadlo.



Obr. 1.2 Uspořádání zrcadel optického rezonátoru (2):

a) konfokální stabilní: 1) nepropustné zrcadlo, 2) polopropustné zrcadlo, 3) výstupní záření, 4) zadní zrcadlo, 5) přední zrcadlo,

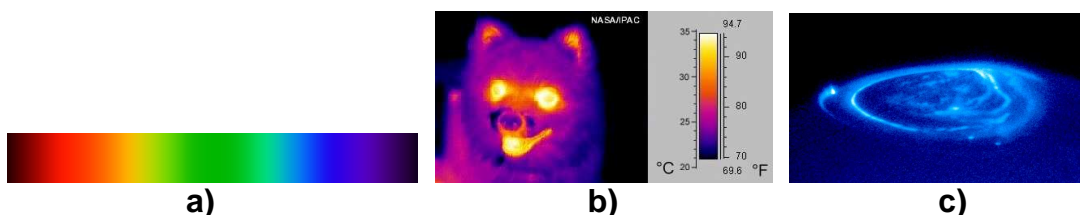
b) konfokální nestabilní: 1) nepropustné zrcadlo, 2) polopropustné zrcadlo, 3) výstupní záření, 4) zadní zrcadlo, 5) přední zrcadlo



Obr. 1.3 Ukázka helium-neonového laseru (9)

1.2 Princip laseru na atomární úrovni

Laser je ve své podstatě kvantový optický zdroj elektromagnetického záření, kde vzniká úzký svazek intenzivních světelných paprsků spadajících do viditelného (obr. 1.4a), ale i lidským okem neviditelného barevného spektra (dle druhu použitého aktivního prostředí), jako jsou například ultrafialové (UV) (obr. 1.4b) nebo infračervené (IR) (obr.1.4c) elektromagnetické záření.

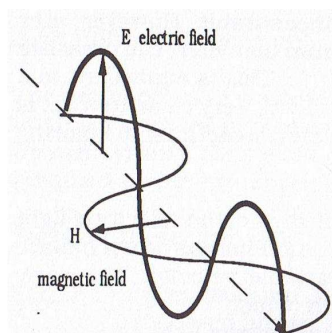


Obr. 1.4 Barevná spektra (5): a) viditelná barevná škála, b) infračervené elektromagnetické záření (IR), c) ultrafialové elektromagnetické záření (UV)

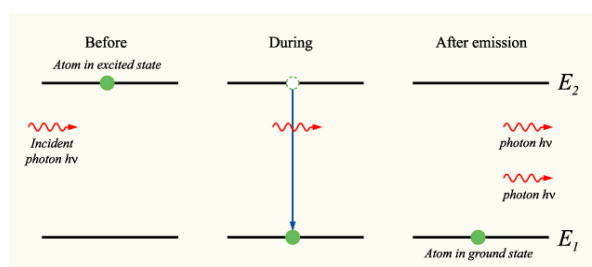
Elektromagnetické záření (vlnění) je kombinací magnetického vektorového a elektrického vektorového pole (obr. 1.5) vznikající díky emisi fotonů. Fotony jsou částice emitované atomy popisující kvantum elektromagnetické energie a šířící se ve vlnách elektromagnetického záření. Toto záření si budeme představovat jako vlnění (obr. 1.7). To je charakterizováno především rychlostí šíření vlny, vlnovou délkou, frekvencí a s tímto typicky spojenými interferenčními jevy. Interferenční jevy se vyskytují tehdy, šíří-li se prostředím více vlnění z různých zdrojů různých charakterů. Střetnou-li se vlny každého z nich v libovolném bodě, dojde ke skládání vln principem superpozice, což má za následek snížení či zvýšení amplitudy kmitání v tomto bodě. *Určení výsledného vlnění je v obecném případě značně složitý proces, neboť skládaná vlnění se mohou odlišovat amplitudou, frekvencí, fází nebo směrem šíření* (9). Toto je pro nás v případě laseru nežádoucí a proto použijeme zdroje vlnění o stejné frekvenci, stejném směru kmitání a s pevně daným (neproměnným) fázovým rozdílem (obr.1.8). Jako první zdroj vlnění použijeme budící zařízení (výbojku, elektrický proud, ultrazvuk etc.) a druhým zdrojem pro nás budou samotné atomy aktivního prostředí. Z kvantové mechaniky víme, že existují tři procesy při vzájemném působení látky a záření a tato jsou: stimulovaná absorpce, spontánní emise a stimulovaná emise. Z těchto tří procesů je pro nás nejdůležitější právě stimulovaná emise záření, ale pro celkové porozumění problému si přiblížíme fyzikální podstatu každého z nich.

Představme si nyní nejjednodušší model atomu látky aktivního prostředí – vodíku H – mající dvě energetické hladiny (orbity) a zejména pak elektrony obíhající po těchto orbitách kolem jádra atomu. Je známo, že mezi kladně nabitým jádrem atomu (proton⁺, neutron) a záporným elektronem působí elektrostatická přitažlivá síla. Velikost těchto sil se odvíjí od polohy elektronu na orbitě v daném okamžiku, kde orbita může být dle použité látky různých tvarů. S rostoucí vzdáleností elektronu od jádra rostou i síly mezi nimi. Budeme-li na atom působit energií budícího zařízení, tzn. budeme-li na něj vysílat proud fotonů, bude elektron obíhající kolem jádra donucen přejít ze základní energetické hladiny (orbity) do vyšší, přičemž pohltí kvantum energie, které jej k tomuto přechodu přinutilo.

K interakci fotonu s atomem dojde tehdy, má-li alespoň jeden foton z proudu energii rovnou rozdílu energetických hladin, na nichž se vyskytuje elektron. Není-li tomu tak, je foton atomem odchýlen z jeho původní dráhy. Tento proces je nazýván stimulovanou absorpcí (excitací). Nepůsobíme-li dále na atom žádnou energií, vlivem snahy o dosažení rovnovážného (základního) stavu se elektron přesune zpět do původní polohy za současného vyzáření výše uvedeného přebytečného kvanta energie. Tento jev nazýváme spontánní emise. Stimulované emise dosáhneme tím, že atomu ve stavu stimulované absorpce dodáme další kvantum energie o energii rovné rozdílu jeho energetických hladin. V takovém případě stimulujeme elektron k přechodu do základní energetické hladiny a současně je vyzářen další foton. To znamená, že při stimulované emisi získáme dvojnásobek kvanta světelné energie do procesu vloženého. Velmi podstatný je fakt, že takto vyzářený foton má identické vlastnosti s fotonem, který tento proces vybudil (stejná vlnová délka a s tím související pevný fázový rozdíl, stejná frekvence, polarizace a směr a rychlost šíření) (obr. 1.6).



Obr.1.5 Elektrické a magnetické vektorové pole elektromagnetického záření (9)



Obr. 1.6 Stimulovaná emise záření (9): vlevo - atom v excitovaném stavu (elektron ve vyšší energetické hladině) a dopadající foton příchozího záření, **uprostřed** – přechod elektronu do základní hladiny, **vpravo** – dva emitované fotony o stejném charakteru

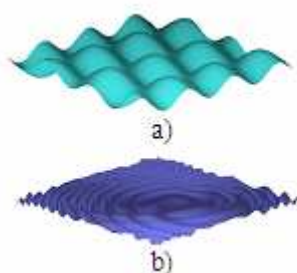
Výsledné záření (vlnění) je nazýváno koherentní (fotony obou vlnění jsou ve svazku paprsků téměř rovnoměrně rozprostřeny a šíří se stejným směrem) a monochromatické (má jednu přesně definovanou vlnovou délku), což nám

umožňuje soustředit světelný paprsek do velice malé oblasti vzhledem k relativně velké vzdálenosti jeho dopadu.

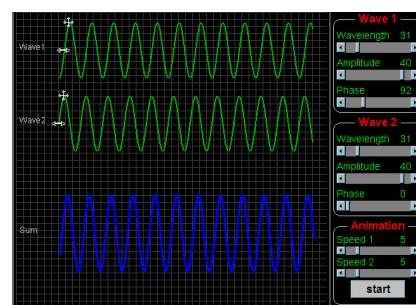
Právě stimulovaná emise záření nám zajišťuje dostatečnou „sílu“ paprsku laseru potřebnou kupříkladu k obrobení různorodých materiálů. Abychom dosáhli maximální účinnosti laseru, je zapotřebí dosáhnout tzv. populační inverze nebo, chcete-li, inverze populace částic aktivního prostředí. Tento jev je nutnou podmínkou pro praktické využití stimulované emise.

Je zřejmé, že atomy každého prvku, nejsou-li jakýmkoli způsobem buzeny k jinému aktu, se přirozeně snaží zaujmout stav, ve kterém je nutno vydat nejméně energie, aby v tomto stavu mohly přetrvávat. Takový stav je znám jako základní a atom je schopen přijímat energii, tzn., že atom je ve stavu schopném absorpce. Za normálních okolností je počet atomů schopných absorpce v daném prostředí mnohonásobně vyšší, než ojedinele se vyskytujících atomů excitovaných (stav stimulované absorpce) a proto „posvítíme-li“ na takovéto prostředí, intenzita dodaného světla se při průchodu látkou snižuje, jelikož atomy látky absorbují kvantum energie již zmíněného dodaného světla. Pro dosažení stimulované emise je třeba přesného opaku, tzn. dostat převážnou většinu atomů látky do stavu excitovaného - populační inverze - a tím získat prostředí, které je schopné při dalším vstupu kvanta energie vyzářit jeho dvojnásobek, což bylo popsáno výše. K vybuzení atomů látky za účelem vytvoření inverze populace je nejčastěji využíváno světelného záření, elektrického výboje či chemické reakce.

Shrneme-li nyní velice stručně výše uvedené informace, můžeme říci, že laser pracuje následovně: Mějme konstrukci laseru z bodu 1.1. Aktivní prostředí laserového média vybudíme do stavu inverze populace a následně dodáme další energii budícím zařízením, čímž získáme stimulovanou emisi. Vzniklé fotony mají dostatečnou energii k průchodu polopropustným zrcadlem a výsledkem je světelný paprsek laseru o určité vlnové délce.



Obr. 1.7 Příklad interference vlnění (9):
a) rovinné vlny, b) kruhové vlny



Obr. 1.8 Interference dvou vln (29)

1.3 Přehled základních druhů laseru

V dnešní technicky již značně rozvinuté společnosti, vezmeme-li v úvahu téměř sto let vývoje laserových technologií, jsou známy již stovky nejrůznějších laserů sahajících do nejrůznějších disciplín a mající rozličná využití. V následující podkapitole si uvedeme přehled nejznámějších laserů, z nichž vybereme pro stručný rozbor ty druhy, které jsou v nejhojnější míře využívány v průmyslových aplikacích a to především v oblasti strojírenství při obrábění materiálů, jak bude uvedeno v kapitole 2. Zmíněn zde bude princip funkce laserů spadajících do jednotlivých skupin, výhody, nevýhody a jejich aplikace.

V úvodu je třeba seznámit se s faktem, že lasery je možno dělit dle různých hledisek:

Dle použitého aktivního prostředí:

- pevnolátkové;
- plynové;
- kapalinové;
- lasery využívající svazky nabitých částic.

Dle způsobu buzení:

- opticky;
- chemicky;
- elektricky;
- termodynamicky;
- jadernou energií.

Dle pracovního režimu:

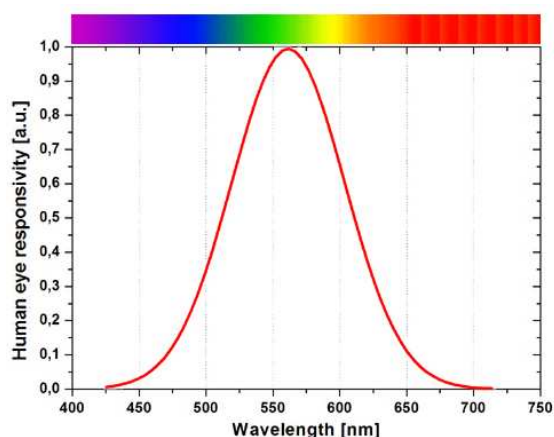
- kontinuální;
- impulsní.

Dle vlnové délky a barevného spektra (obr. 1.9):

- submilimetrové;
- infračervené (IR);
- lasery spadající do viditelného světelného spektra;
- ultrafialové (UV);
- rentgenové (X-ray).

Dle způsobu použití:

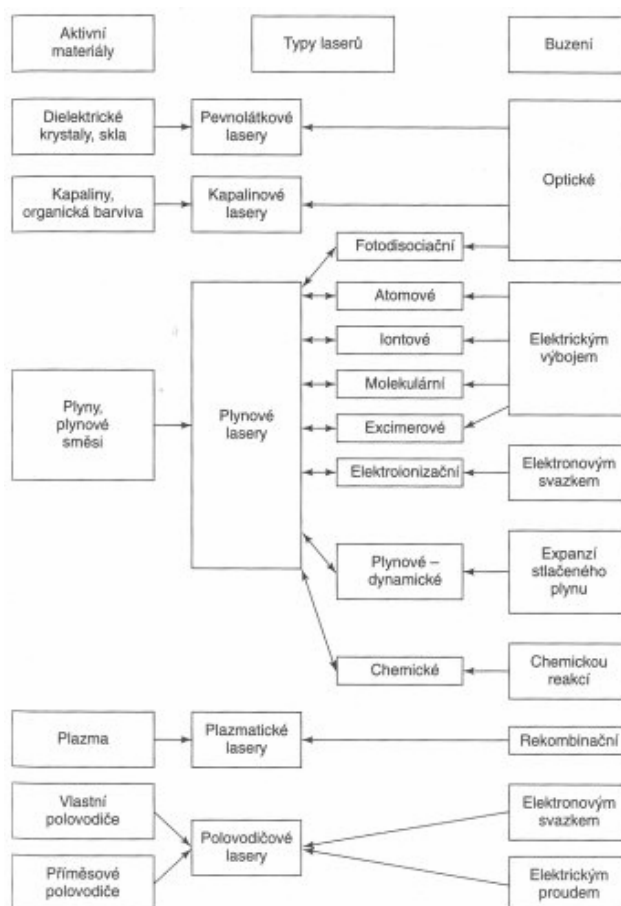
- výzkumné;
- měřicí;
- lékařské;
- technologické;
- energetické;
- vojenské.



Obr. 1.9 Závislost viditelnosti barevného spektra na vlnové délce záření (5)

Jako laserové prostředí mohou sloužit rozličné materiály v různých skupenských stavech. Vlastnosti materiálu aktivního prostředí se proto od sebe velmi výrazně liší a je výhodné sledovat odděleně lasery s aktivním prostředím z látek pevných, kapalných a plyných (24).

Základní rozdělení laserů:



Obr. 1.10 Přehled základních druhů laseru (1)

1.3.1 Pevnolátkové lasery

V širším smyslu slova lze do této kategorie začlenit všechny lasery, jejichž aktivní prostředí je v pevném skupenství. Dále je možno rozdělit tuto kategorii dle vodivosti a to na lasery polovodičové a izolátorové (laserovým médiem je polovodič nebo izolant) a ty lze následně rozdělit na pevnolátkové iontové lasery a tzv. lasery s barevnými centry. U této sorty laserů tvoří aktivní prostředí opticky propustná matriční látka (homogenní krystal – oxidy, granáty, vanadáty, beriláty, molybdáty, tungstáty, silikáty, fosfáty, oxysulfidy, fluoridy, alumináty apod.; amorfni látka – sklo, keramika) a aktivní příměs látky cizorodé (vzácné zeminy – Nd, Er, Pr, Yb, Ho apod.; prvky ze skupiny železa – Cr, Ti apod.), jejímiž ionty je toto krystalické, či amorfni prostředí dopováno. *Pevná fáze v těchto případech tvoří vlastně jen nosný skelet aktivního prostředí. K vlastnímu optickému zesilování dochází na elektronových přechodech iontů příměsí (10).*

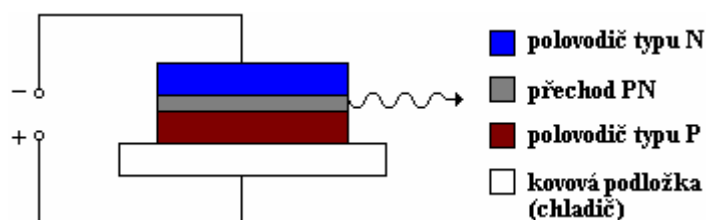
Generované vlnové délky zahrnují viditelnou a IR oblast záření. Pevnolátkové lasery se vyíjmají vysokou flexibilitou a jsou schopny pracovat v široké škále režimů. Velikou výhodou těchto laserů je jejich robustnost, vysoká stabilita a nízké nároky na údržbu a pracovní podmínky. Oproti plynovým laserům jsou pevnolátkové praktičtější, protože světlo jimi produkované o vlnové délce okolo 1064nm lze přenášet skleněnými vlákny tam, kde je ho zapotřebí. *Na druhé straně je však pravda, že klasické pevnolátkové lasery, zvláště pokud se od nich vyžadují vyšší výkony, mají obecně nižší kvalitu paprsků než CO₂ lasery. Proto jako zesilovače - médium - se v nich instaluje pevnolátková tyč, kolem níž jsou umístěny pumpovací lampy. Tyč je umístěna ve skleněné trubici, kterou protéká destilovaná voda. Tím se mění optické vlastnosti tyče a vzniká tzv. termická čočka. Avšak toto lze aplikovat jenom do výkonu 5 kW, protože pak tyč začíná emisi světla příliš rozptylovat (10).* Takový laser je nazýván tyčový.

Za účelem získat vyšší výkony pevnolátkových laserů, jelikož kvalita paprsků při větším zatížení média laseru tyčového charakteru nebyla a není dostatečná, byla snaha změnit povrch média na maximální možný, aby byla možnost jeho dobrého chlazení. Toho se dosáhlo buď prodloužením tyče, čímž vznikne laser vláknový a nebo naopak zpěchováním, čímž dáme za vznik laseru kotoučového, jehož rozměry odpovídají velikosti lidského nehtu. Oba výše uvedené jsou v dnešním průmyslu hojně užívány. U těchto laserů a především u laseru kotoučového bývá aktivním médiem zpravidla směs s mateční látkou krystalu yttria hliníku a díky dnes již velice kvalitně a důmyslně zpracované optice těchto laserů je pumpovaný světelný paprsek poslán skrze médium až 20x, což nám zaručuje dostatečný výkon. *Jak vláknový, tak kotoučový laser vykazují asi 5-10krát lepší kvalitu laserových paprsků než tyčový (pevnolátkový) laser s pumpovacími lampami o srovnatelném výkonu. Díky tomu je také možno v prvních dvou případech umísťovat opracovávaný kus dále od laserové hlavy než ve třetím případě. Jednak se tím rozšiřuje pracovní pole laseru, a hlavně se tím vylučuje riziko, že z opracovávaného kusu budou odšťikovat kapičky kovu až do laseru, kde by mohly poškodit jeho citlivou optiku (10).* Značně rozšířené jsou lasery s neodýmovým sklem, kde jsou ve skleněné matici rozptýleny ionty neodymu (Nd:sklo) a dále potom lasery, jejichž matici (mateční látku) tvoří krystal yttrium alluminium granátu, jinak též yttrium – hlinitého granátu (YAG). Nejznámějšími a pro nás nejdůležitějšími (v průmyslu nejvyužívanějšími) z této kategorie jsou lasery

Nd:YAG, Nd:YVO₄, Yb:YAG, Yb:sklo, Cr:LiCAF, Cr:LiSAF a laser Alexandritový. Jejich uplatnění lze vidět v oblastech vrtání, řezání, sváření a popisování.

1.3.1.1 Polovodičové lasery

Významnou podskupinou pevnolátkových laserů jsou polovodičové lasery, jinými slovy laserové diody. *Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou být injektovány (2).* Rozdíl v jejich činnosti je oproti jiným laserům takový, že nepracují s přechodem elektronů mezi energetickými hladinami, ale s přechody elektronů mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. Tzn., že injektované elektrony zaplní prázdná místa v nenasycené vazbě a tím se dostane do valenční sféry, která má větší energii než sféra vodivostní. Přebytku energie se elektron zbaví vyzářením fotonu. Jsou dnes nejrozšířenější skupinou laserů díky jejich aplikaci v telekomunikacích, výpočetní technice, optoelektronice apod. Velice často jsou zdrojem buzení (čerpání) pevnolátkových laserů a díky nim vznikají vysoce výkonné flexibilní laserové generátory miniaturních rozměrů. Základní představitelé polovodičových laserů jsou polovodičové lasery buzené svazkem elektronů a dále potom injekční polovodičové lasery buzené elektrickým polem. Tyto využívají vlastností PN přechodu (obr. 1.11) a dosahují výkonů v rozmezí 30W až 6kW. *Hlavní předností polovodičových laserů je jejich kompaktnost, velká účinnost (až 50%), možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a pomocí výběru aktivního prostředí generace záření různých vlnových délek (2).* Pracují v kontinuálním i pulzním režimu. Typické nevýhody jsou citlivost na změnu teploty s čímž kolísá výstupní výkon a účinnost laseru a kvůli malým rozměrům dochází k divergenci výstupního paprsku. Průmyslové využití našly v oblastech svařování, tepelného zpracování a nanášení povlaků. Pro nás zajímavý je především AlGaAs laser.



Obr. 1.11 Princip funkce polovodičového laseru (11)

1.3.2 Plynové lasery

Plynové lasery se ukázaly být velmi perspektivní a kvalitní zdroje UV a IR světla. Vzhledem k vhodným vlnovým délkám těchto spekter našly široké uplatnění v průmyslu. Aktivní médium lze do pracovního prostoru laseru přivádět kontinuálně v libovolném množství a tím jej stále obnovovat. Aktivní prostředí plynových laserů je tvořeno plynou fází a to buď atomy, ionty, molekulami nebo kovovými parami (obr. 1.10). Inverze populace atomů nastává mezi energetickými hladinami u některé ze složek aktivního prostředí. Jedná-li se o atomy a ionty, inverze nastává v energetických hladinách elektronového obalu. U molekul se však tyto hladiny dále dělí na rotační a vibrační. Oproti laserům pevnolátkovým, které pracují převážně v režimu pulzním, plynové jsou používány zejména pro režim kontinuální, jelikož přeměna elektrické energie ve výboj v plyném prostředí je hospodárnější, a dokáže pracovat ve značně rozsáhlém spektru vlnových délek. Existují ale také výkonné pulzní systémy. Buzení plynových laserů může být provedeno rozličnými způsoby, jako jsou: buzení elektronovým svazkem, buzení elektrickým výbojem za vysokých tlaků (TEA CO₂ laser viz. níže), chemickou reakcí nebo termickou expanzí. Často bývá používán stejnosměrný, vysokofrekvenční nebo mikrovlnný generátor, který „zapálí“ elektrický výboj v trubici naplněné plynem či pulzní nebo kontinuální výbojka. Díky vysoké homogenitě plyného prostředí vyniká velice dobrou homogenitou i emitovaný světelný paprsek, což má vliv na jeho nízkou divergenci. Plynové lasery se vyznačují vysokou účinností, řádově v desítkách procent. Nejznámějšími typy plynových laserů jsou: helium-neonový laser, argonový laser, měděný laser, jódový laser, helium-kadmiový laser, vodíkový laser, dusíkový laser, chemické lasery, excimerové lasery a konečně CO₂ lasery. *V technologii opracování materiálů se používají především CO₂ lasery pro řezání a svařování a excimerové lasery pro popisování, mikroobrábění keramických materiálů, obrábění diamantu, čištění povrchu strojních součástí i uměleckých děl a vrtání děr od průměru 10 μm (1).* Nevýhodou plynových laserů je jejich nízký výkon, který lze získat z jednotky objemu a s tímto spojené velké rozměry výkonových plynových laserů. Nevýhodou oproti pevnolátkovým laserům je skutečnost, že zobrazovací optika zaměřující světelný paprsek na obráběný materiál musí být regulována pomocí zrcadel a paprsek nelze do libovolného místa dopravit skrze skleněná vlákna.

Chemické lasery využívají k čerpání energie do aktivního prostředí energie exotermických řetězových chemických reakcí (2). Mohou dosahovat až megawattových výkonů při kontinuálním pracovním režimu, čehož je využíváno v průmyslu k řezání a vrtání. V průmyslu hojně využívanými z oblasti plynových laserů jsou lasery excimerové, emitující, jako jediné z plynových laserů, ultrafialové záření. Jsou to lasery spadající do podskupiny molekulárních stejně tak, jako chemické lasery. *Tato skupina laserů využívá jako aktivního prostředí zvláštního druhu molekul, excimerů, vytvářených za účasti atomů vzácných plynů. Tyto molekuly, jinak nestabilní, mohou existovat jen za zvláštních podmínek, například v plynovém výboji, s atomy ve vysoce vybuzených, excitovaných stavech (11).* Excimerové lasery našly dobré uplatnění při mikroobrábění.

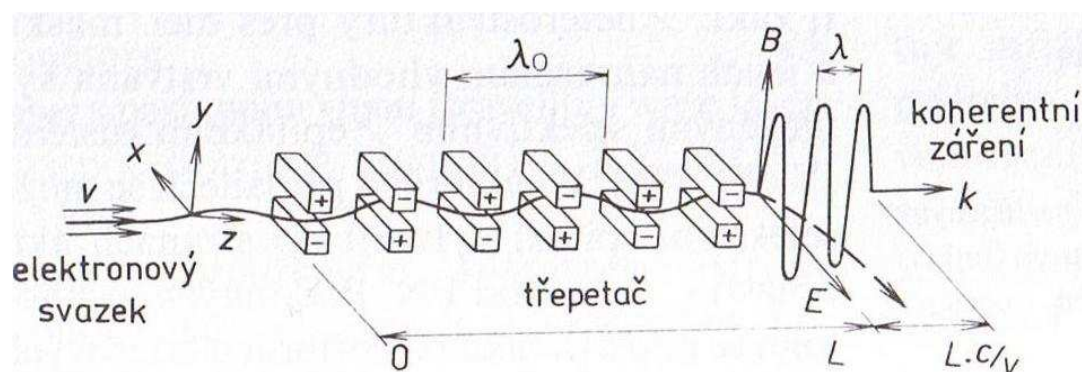
Dále bychom měli krátce zmínit další ze skupiny plynových laserů a to lasery pracující na principu kovových par vzácných prvků. Využívány jsou zejména v aplikacích vrtání a řezání. Nejznámějšími z této skupiny jsou lasery pracující na principu Cu par či NeCu par.

1.3.3 Kapalinové lasery

Aktivním prostředím je kapalina tvořená nejčastěji metalo-organickými sloučeninami či organickými barvivy o zpravidla širokém emisním spektru. Snadnou změnou koncentrace aktivních částic nám umožňuje plynule přeladovat vlnovou délku záření laseru a tím měnit již zmíněné barevné spektrum. Jedná-li se o metalo-organické sloučeniny, aktivní částici laserového média je iont vzácné zeminy (Sm, Tb, Dy, Eu apod.) a maximum emitovaného záření lze měnit změnou obsahu příměsných iontů příměsných prvků jako např. Na^+ , K^+ , Li^+ apod. Buzení je prováděno opticky. Jako výhody kapalinového laseru lze uvést snadné chlazení (např. tekutým dusíkem), stabilitu a homogenitu aktivního prostředí. Nevýhodami jsou vysoká toxicita laserového média a jeho krátká životnost, protože organická část rychle degraduje vlivem působení tepla a světla. V praxi významné uplatnění nenalezly a jsou často nahrazovány lasery pevnolátkovými. Nejznámějšími typy kapalinových laserů jsou: Rh6G laser, Stillbenový laser nebo Kumarínový laser.

1.3.4 Lasery využívající svazky nabitých částic

Jsou to lasery, které nepracují na principu kvantových přechodů jako lasery výše uvedené, ale využívají synchronizované oscilace částic. Většina těchto laserů pracuje na bázi FEL (free electron laser). Z názvu snadno odvodíme, že jejich činnost spočívá na základě volných elektronů. *Aktivním prostředím jsou relativistické elektrony. V laserech s volnými elektrony prochází relativistický elektronový svazek periodickým magnetickým polem (obr. 1.12), které nutí elektrony kmitat v příčném směru. Elektrony při svém pohybu po zakřivených drahách vyzařují elektromagnetické vlnění. Do zařízení vstupují elektrony se stejnou energií v nestejných časových okamžicích. Každý z nich vyzařuje vlnu s jinou fází, vzniká nekoherentní spontánní záření. Vznikající elektromagnetické vlnění předbíhá elektrony a je-li dostatečně intenzivní, ovlivňuje jejich pohyb, některé zpomaluje, některé urychluje. Jestliže rychlost elektronů mírně převyšuje fázovou rychlost elektromagnetické vlny, elektrony jsou bržděny a předávají část své energie vlně. Výsledkem tohoto vzájemného působení, při kterém pohyb elektronů je již ovlivňován elektrickým i magnetickým polem vlny, je vytvoření elektronových zhustků. Záření elektronových zhustků přestává mít chaotický charakter, zesiluje se právě takový typ vlnění, který svazek účinně brzdí. Vyzařování je synchronizováno s pohybem elektronů (25).* Dalším ze skupiny těchto laserů je laser FEL s technologií SASE, která využívá spontánní emise záření (Self-Amplified Stimulated Emission – samostatně zesílená spontánní emise záření), dále pak VUV-FEL (Vacuum-UltraViolet FEL), FLASH (Free-electron LASer in Hamburg), TESLA (Terra-eV Energy Superconducting Linear Accelerator – supravodivý lineární urychlovač pro teraelektronové energie), XFEL (X-ray FEL – rentgenový FEL). Protože svazky elektronů jsou extrémně malé a přicházejí v extrémně krátkých pulzech, mohou být FEL používány ve výzkumu rapid technologií. Časté uplatnění nalézají jako urychlovače částic, generátory nebo zesilovače.

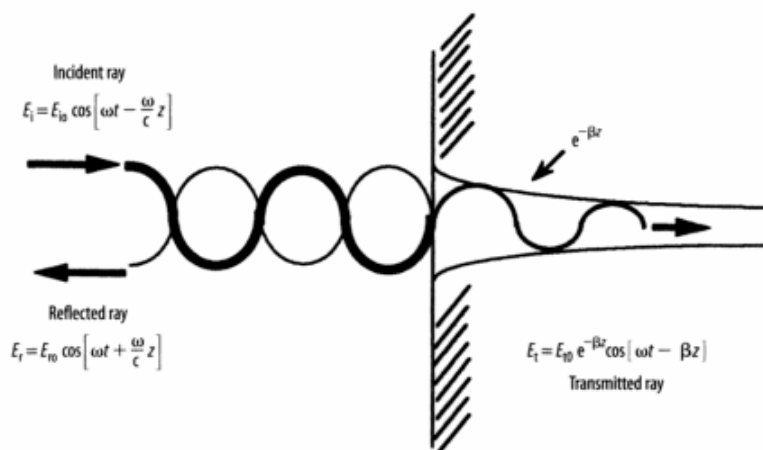


Obr. 1.12 Základní prvky laseru s volnými elektrony (25)

1.4 Interakce laserového paprsku s materiálem – základní pojmy

Při obrábění materiálů je laser využíván jako nositel intenzivního a vysoce energetického paprsku elektromagnetického vlnění (záření), který je usměrňován na opracováváný objekt. Účinek laseru na daný materiál je závislý na charakteru opracováváného materiálu (fyzikální vlastnosti, struktura apod.), parametrech aplikovaného laseru a důležitým aspektem je také doba interakce laserového paprsku s materiálem. V okamžiku dopadu elektromagnetického záření na obráběnou plochu vlna postupuje tak, jak je uvedeno na obr. 1.13. Energie dopadající vlny a vlna samotná je částečně povrchem absorbována, částečně odražena v závislosti na tvaru povrchové plochy a částečně přenesena materiálem pryč z místa dopadu.

Opracováváný materiál se pro dopadající vlnění stává novým laserovým médiem a je tímto médiem absorbováno v souladu s pravidly absorpce dle Beer-Lamberta $I = I_0 \cdot e^{-\alpha z}$ (10). Kde I je intenzita světelného paprsku po průchodu médiem, I_0 je intenzita před průchodem médiem, α je tzv. absorpční součinitel a z je tloušťka média. Výsledek interakce laserového paprsku s materiálem významně závisí na absorpčním součiniteli α , který je odvislý od vlastností materiálu, vlnové délky a intenzity paprsku. Z hlediska obrábění materiálů je pro nás nejzajímavější ta „část“ laserového paprsku, která je materiálem absorbována.



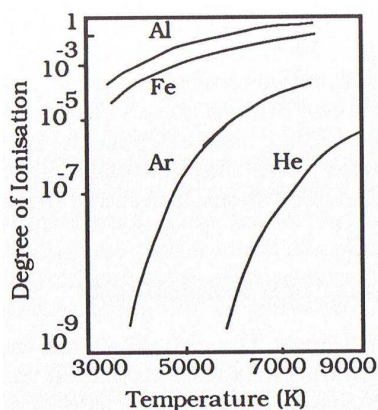
Obr. 1.13 Interakce světelného paprsku s materiálem (10): Fáze a amplituda E , elektromagnetického paprsku o frekvenci ω , jdoucí ve směru z , procházející rozhraním vzduch/pevná látka a podstupující reflexi a přenos

Elektromagnetické záření, jak již bylo zmíněno, můžeme uvažovat jako elektrické vektorové pole a magnetické vektorové pole, což je ilustrováno na obr. 1.5. Při jeho průchodu skrze nabitou a elasticky vázanou částici dojde k vyvolání pohybu této částice elektrickou silou elektrického vektorového pole \mathbf{E} . Za předpokladu, že frekvence záření neodpovídá přirozené rezonanční frekvenci částic, potom nenastane fluorescence ani absorpce, ale vznikají silové vibrace. Síla vyvolaná elektrickým polem je velmi malá a není schopná rozvibrovat jádro atomu. Výše jsme diskutovali součinnost fotonů s elektrony buď volnými nebo vázanými. Tento proces, kdy jsou fotony absorbovány elektrony je znám jako “Bremsstrahlungův inverzní efekt” (Bremsstrahlungův efekt je emise fotonů z excitovaných elektronů). Vibrující elektrony budou buď opětovně vyzařovat do všech směrů nebo budou umírněny fonony mřížky (vazebná energie uvnitř tuhé nebo kapalné struktury). V druhém případě budou fonony způsobovat vibraci struktury a tato vibrace bude přenesena skrze strukturu materiálu běžnými difúzními procesy v závislosti na molekulové vazbě struktury. Vibrace ve struktuře zaznamenáváme jako teplo (10, str.62). Jinými slovy, světelný paprsek o dané frekvenci je absorbován materiálem ve formě elektronové a vibrační excitace atomů krystalové mřížky materiálu (příchozí paprsek rozvibruje částice materiálu na stejnou frekvenci) a takto vzniklá energie se mění v teplo, které je disipováno sousedními atomy. S narůstajícím množstvím absorbovaných fotonů (energie) se vibrace stávají natolik intenzivními (roste teplota v místě dopadu a ovlivněném okolí), že překlene interatomární síly pevného stavu a dojde ke změnám vzdáleností mezi atomy a ke změně struktury materiálu. V takovém případě říkáme, že materiál přechází ve stav tavení. S tímto se zvyšuje i podíl absorbovaného záření a tento proces spustí řetězovou reakci, která způsobí velmi rychlý nárůst teploty v místě dopadu paprsku ve velmi krátkém čase (řádově milisekundy u svařování). Při dalším zvyšování teploty se vazby mezi atomy dále zeslabují díky velice silným molekulárním vibracím a materiál přechází do stavu vypařování. Pára je stále schopná absorbovat záření, ale jenom mírně, dokud bude mít vázané elektrony; výjimka nastane, když plyn je dostatečně horký tak, že

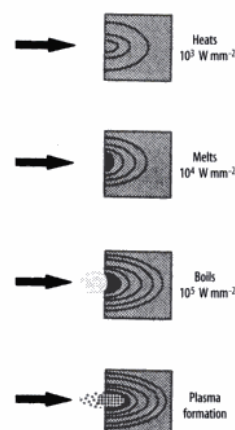
elektrony jsou rozechvěny natolik, aby se staly volnými a v takovém případě nazýváme tento plyn plazmou. Plazma může být silně absorbující, pokud jeho elektronová hustota je dostatečně veliká. Elektronová hustota v plazmatu je dána rovnicí (1.1) (10, str. 63). Rychlost teplotního nárůstu závisí na vyváženosti mezi energetickou absorpcí a energetickou disipací materiálu:

$$\ln(N_i / N_0)^2 = - 5040[V_i / T] + 1.5\ln(T + 15.385) , \quad (1.1)$$

kde N_i = ionizační hustota; N_0 = hustota atomů; V_i = ionizační potenciál, eV;
T = absolutní teplota.



Obr. 1.14 Stupeň ionizace jako funkce teploty (10)



Obr. 1.15 Posloupnost absorpčních jevů měnící se s absorbovanou energií (10)

Hodnota absorpčního součinitele se bude měnit se stejným účinkem jako vliv odrazivosti. Pro neprůhledné materiály: odrazivost = 1 – absorptivita; pro průhledné materiály: odrazivost = 1 – (propustnost + absorptivita). U kovů je záření převážně absorbováno volnými elektrony v „elektronovém plynu“. Tyto volné elektrony mohou nevázaně oscilovat a vyzařovat, aniž by poškodily tuhou atomovou strukturu. Jak vlnoplocha přichází na povrch materiálu, všechny volné elektrony na povrchu vibrují, přičemž generují elektrické pole s fází o 180° posunutou oproti fázi příchozího paprsku. Součtem tohoto pole bude paprsek, jehož úhel odrazu se rovná úhlu dopadu. Tento „elektronový plyn“ v kovové struktuře způsobuje, že záření není schopné prostoupit kovem do žádné významné hloubky, ale pouze do hloubky asi jednoho až dvou atomových průměrů. Kovy jsou tudíž neprostupné a zdá se, že svítí (10, str. 66). Tedy pokud ne všechny částice materiálu rezonují na stejné frekvenci jako emitované světlo dopadající na jeho povrch, potom tyto částice (elektrony nebo atomy) vibrují na budící frekvenci vyvolané elektrickým polem, přičemž generují světlo. Jedná-li se o hladký povrch (reflexe závisí na tvaru a hrubosti povrchu), k odrazu paprsku dojde pod stejným úhlem jako je úhel dopadu. Tomuto jevu se říká reflexe – odraz. Závislost odrazivosti a absorpčního součinitele na vlnové délce dopadajícího

paprsku lze vidět na obr. 1.16a. V materiálu stejný proces světla emitovaného vynucenými vibracemi generuje vlny, které se střetávají s příchozím zářením. Toto vzájemné ovlivnění závislé na fázovém posunu emitovaného světla mění fázovou rychlost světla v dielektriku. Index lomu materiálu n je vztah mezi rychlostí světla c a fázovou rychlostí světla v médiu. Index lomu dielektrika určuje velikost reflexe z povrchu v kombinaci s úhlem dopadu a stavem polarizace dopadajícího paprsku. Při normálním dopadu, kdy je polarizace nepodstatná je odrazivost dielektrika R (13, str. 7), (15, str. 68):

$$R = [(n-1)/(n+1)]^2 , \quad (1.2)$$

a vlnová délka (13, str. 6):

$$\lambda = (2\pi/\omega) \cdot (c/n) , \quad (1.3)$$

kde λ = vlnová délka; ω = úhlová frekvence; c = rychlost světla; n_1 = index lomu média kde $n_1 = 1$ pro vakuum; c/n_1 = fázová rychlost.

Vztah 1.2 vyjadřuje odrazivost rovinné plochy při kolmém dopadu paprsku laseru z vakua či vzduchu. V absorpčním médiu reálný index lomu n musí být nahrazen komplexním indexem lomu $\mathbf{n} = n + ik$. Význam indexu k (často nazývaný koeficient zániku) začíná být patrný, když vztah (1.3) je vhodně upraven a dosazen do vztahu (1.7). Elektrické pole se při průchodu vzdáleností z zeslabuje v závislosti na faktoru $\exp(\omega kz / c)$, přičemž indikuje, že část světelné energie je absorbována (13). Dle (10, str. 67) lze koeficient odrazu pro $n = 1$ vyjádřit jako:

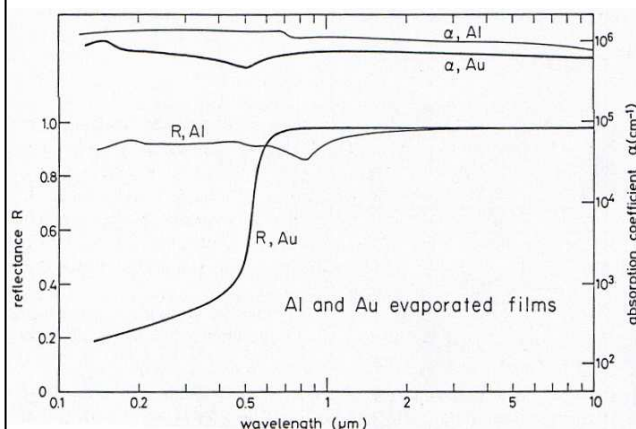
$$R = [(1-n)^2 + k^2] / [(1+n)^2 + k^2] , \quad (1.4)$$

kde n = index lomu dielektrika nebo kovového povrchu; k = koeficient zániku. Potom absorptivita (pohltivost) A je pro neprůhledné materiály jako jsou kovy vyjádřena jako (10, str. 67):

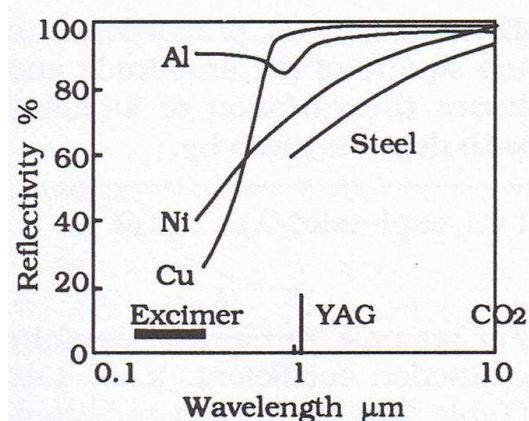
$$A = 1 - R , \quad (1.5)$$

$$A = 4n / [(n+1)^2 + k^2] , \quad (1.6)$$

Některé hodnoty výše uvedených konstant jsou uvedeny v tab. 1.1, kde hodnoty odrazivosti R jsou uvedeny pro téměř dokonale hladký a čistý povrch, což je výjimečný případ.



a)



b)

Obr. 1.16 Odrazivost, resp. absorpční součinitel jako funkce vlnové délky: **a)** pro materiály Au a Al dle (13, str.11), **b)** pro vybrané materiály dle (10, str. 67)

Tab. 1.1 Příklady indexu lomu a koeficientu odrazu některých materiálů pro vlnovou délku 1.06 μm (10, str.68)

Complex refractive index and reflection coefficient for some materials to 1.06 μm radiation (9).			
Material	k	n	R
Al	8.50	1.75	0.91
Cu	6.93	0.15	0.99
Fe	4.44	3.81	0.64
Mo	3.55	3.83	0.57
Ni	5.26	2.62	0.74
Pb	5.40	1.41	0.84
Sn	1.60	4.70	0.46
Ti	4.0	3.8	0.63
W	3.52	3.04	0.58
Zn	3.48	2.88	0.58
Glass	0	1.5	0.04

Intenzita elektrického vektorového pole vlny procházející homogenním a neabsorpčním médiem může být vyjádřeno jako (13, str.5):

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 * e^{i(2\pi z / \lambda - \omega t)} \quad (1.7)$$

kde z = směr šíření vlny; ω = úhlová frekvence; λ = vlnová délka; \mathbf{E}_0 = intenzita vektorového el. pole před průchodem a \mathbf{E} = int. vektorového el. pole po průchodu médiem.

Intenzita vlnění je dle (10, str. 68) úměrná kvadrátu el. vektorového pole \mathbf{E} a proto intenzita po výše uvedených úpravách přechází do tvaru:

$$I = I_0 \cdot e^{(-4\pi k z / \lambda)} \quad (1.8)$$

který odpovídá Beer-Lambertovu pravidlu dle (10).

Totální výkon paprsku je potom dán vztahem dle (13, str. 7):

$$P = \pi w^2 I_0 \quad (1.9)$$

Již výše uvedený koeficient absorpce vypočteme dle (13, str. 7) ze vztahu:

$$\alpha = -(1/I) \cdot (dI/dz) = (2\omega k / c) = (4\pi k / \lambda) \quad (1.10)$$

Důležitým faktorem pro proces absorpce záření a pro proces obrábění obecně je tzv. optická absorpční délka. *Je definována jako délka, na které je energie fotonu absorbována tak, že intenzita paprsku klesne na hodnotu 1 / e (37%) jeho původní hodnoty. Energie absorbovaná skrze tyto kvanta produkuje tepelnou energii, která je rozptýlena (difundována) do vzdálenosti L dle (1.12) (29):*

$$L = (4at)^{0.5} \quad (1.11)$$

kde L = difúzní délka; a = tepelná vodivost; t = délka trvání pulzu laseru.

Pokud $1/e \ll L$, potom teplota rostoucí v bodě dopadu paprsku na materiál bude omezena. V opačném případě, pokud $L \ll 1/e$, vznikne velmi rychlý nárůst teploty v místě dopadu paprsku a dojde k tavení a vypařování materiálu. K dosažení požadovaných výsledků týkajících se obrábění materiálů, jako jsou pájení, svařování, řezání, vrtání, značkování, mikroobrábění apod., musíme zvolit vhodnou vlnovou délku a šířku paprsku laseru v místě dopadu. *Porovnáním optické absorpční délky s difúzní délkou obdržíme prahovou hodnotu, která je použita jako vodítko pro stanovení délky trvání dopadu paprsku o dané šířce pro přesnou hodnotu frekvence (29).* Hodnoty trvání dopadu paprsku jsou pro určitý excimerový laser uvedeny v tab. 1.2.

Tab. 1.2 Kalkulace délky trvání pulzu potřebné k dosažení teplotní difúze pro excimerový laser o vlnové délce 248 nm u vybraných materiálů (29)

MATERIÁL	DRUH LASERU	TEPLOTNÍ VODIVOST [cm ² /s]	ABSORPČNÍ DÉLKA [cm]	DÉLKA TRVÁNÍ PULZU [ps]
Nerezová ocel	Excimerový	0,056	0,00001	446
Nikl	Excimerový	0,13	0,00001	114
Křemík	Excimerový	0,86	0,00001	29

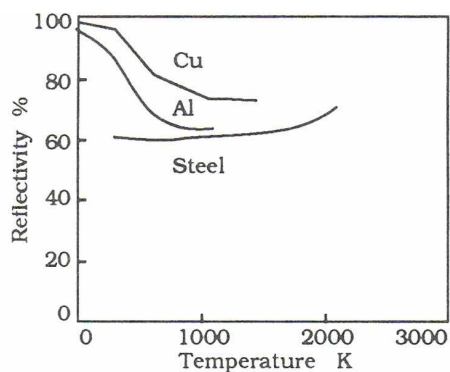
V tab. 1.2 je uvedena kalkulace délky trvání pulzu, která je potřebná k dosažení tepelné difúze pro vlnovou délku 248 nm daného excimerového laseru. *Rozdílné délky pulzu jsou potřebné pro porovnání difúzní a absorpční délky u excimerových vlnových délek pro mikroobrábění. Délky trvání pulzu jsou pouze pro porovnání. Vzhledem k tomu, že absorpční vzdálenosti jsou pro kovy podobné, pak rozdíl v časových měřících je dán odlišností v difúzních vzdálenostech (29).* Uvedme jako příklad nerezovou ocel, která má relativně špatnou vodivost oproti niklu a proto může být mikroobráběna pouze v případě mnohem déle trvajících impulzů, než jak je tomu u niklu. Na druhou stranu vezmeme-li v úvahu křemík, který je velmi dobrým vodičem, je třeba oproti niklu nebo nerezové oceli zapotřebí mnohem kratšího trvání pulzu k dosažení rozrušení materiálu.

Doba mezi srážkou elektronů paprsku s materiálem je asi 10^{-13} s. To znamená, že pro takovéto extrémně krátké pulzy (lasery generující pulzy okolo 1ps) je možné, že opracovávaný materiál bude obsahovat dvě teploty v nerovnováze – elektronovou teplotu a atomovou teplotu. Rovněž pro velmi krátké pulzy byla stanovena non Fourierova konduktance ve které je formulována koncentrace (komprese) a tepelná vlna. Toto má souvislost například s akustickými signály nebo nárazovým kalením. U femtosekundových pulzů (10^{-15} s) při interakci mezi materiálem a laserem nastane nelineární multifotonový proces jako následek velmi vysoké hustoty dopadající energie ve velmi krátkém čase (nelineární efekty při působení světelného paprsku budou zmíněny níže). Tento proces je tak rychlý, že dojde k „oškubání“ atomů z povrchu, aniž by byly poškozeny atomy sousední. Z tohoto důvodu jsou femtosekundové lasery vhodné pro mikroobrábění, protože nezanechávají narušené vrstvy na exponované ploše.

Na reflexi, popřípadě absorpci mají vliv i jiné činitele. Těmito činiteli rozumíme především vlnovou délku, teplotu, tenký film na povrchu obráběného materiálu, úhel dopadu nebo vliv materiálu a drsnosti povrchu. V následujícím textu si krátce tyto vlivy přiblížíme.

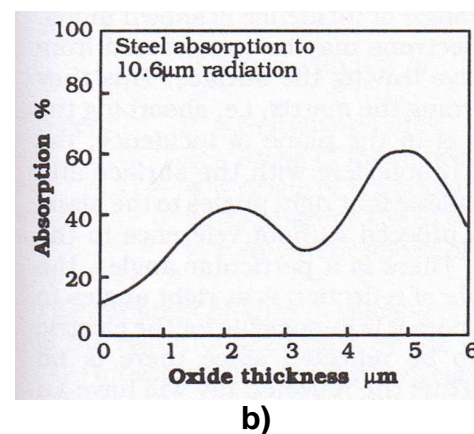
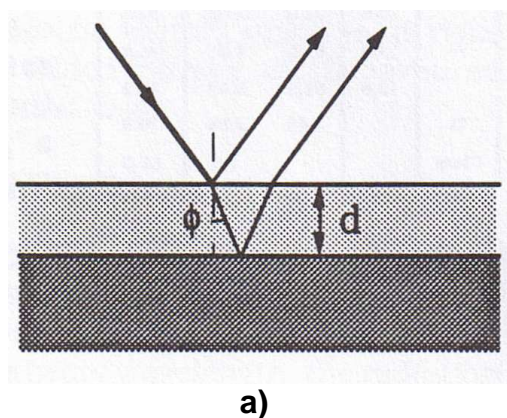
- **Vliv vlnové délky světelného paprsku:** Při kratších vlnových délkách mohou být fotony s větší energií ze svazku světelného paprsku absorbovány větším počtem vázaných elektronů materiálu. Proto odrazivost se zkracující se vlnovou délkou klesá a pohltivost povrchu materiálu naopak stoupá, jak je uvedeno na obr.1.16.

- **Vliv teploty:** S rostoucí teplotou struktury materiálu zaznamenáváme nárůst populace fononů¹, což způsobuje, že fonony a s nimi reagující elektrony si mezi sebou vyměňují více energie. Tudiž elektrony pravděpodobněji vzájemně reagují se strukturou spíše, než že oscilují a zároveň zpětně vyzařují. V takovém případě se snižuje odrazivost a zvyšuje se pohltivost společně s nárůstem teploty, jak můžeme vidět na obr. 1.17.



Obr. 1.17 Závislost odrazivosti materiálu na teplotě povrchu (10)

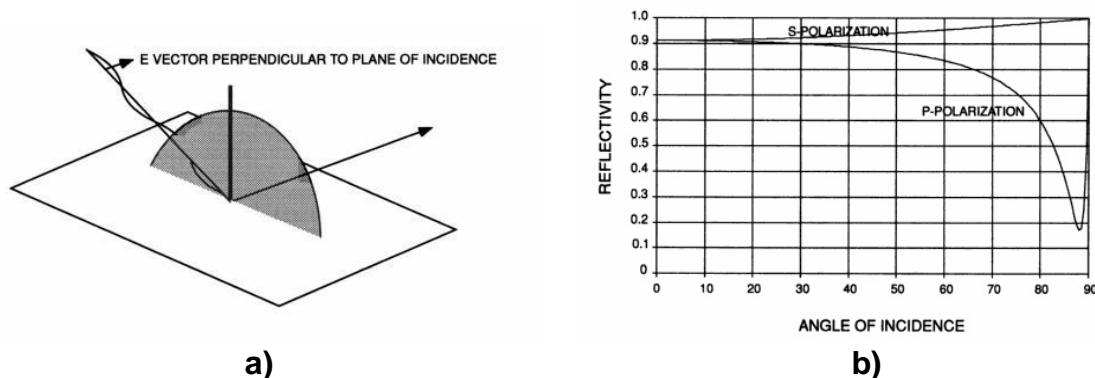
- **Vliv povrchové vrstvy:** Odrazivost je v podstatě povrchový jev a proto povrchová vrstva může mít rozsáhlý vliv. Obr. 1.18a ukazuje, že pro přerušení vazby musí mít vrstva šířku okolo $[(2n+1) / 4] * \lambda$, aby měla jakýkoli vliv, kde n je libovolné celé číslo. Odchylna pohltivosti pro záření CO_2 laseru povrchovou vrstvou oxidů je znázorněna na obr. 1.18b. Jednou z forem těchto povrchových vrstev může být i plazma pod podmínkou, že tato plazma je v termálním kontaktu s povrchem (10).



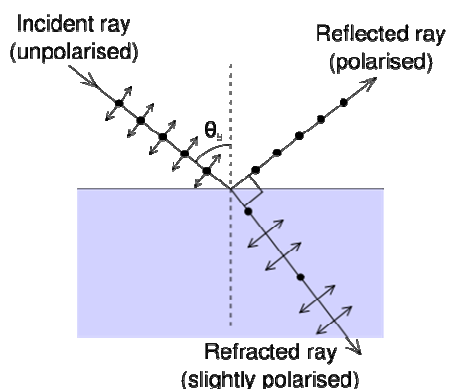
Obr. 1.18 Vliv povrchové vrstvy (10): a) Povrchový film jako „antireflexní nátěr”. Pokud $2d/\cos\Phi=[(2n+1)/2]*\lambda$, potom vznikne destruktivní křížení odráženého paprsku,
b) Závislost pohltivosti na tloušťce povrchové vrstvy oceli pro vlnovou délku 1.06 μm

¹ Fonon je tzv. kvazičástice (nejde tedy o skutečnou částici) šířící vibrační kvantum v krystalové mřížce. Vibrace v krystalové mřížce se mohou přenášet od buňky k buňce a vytvářet tím dojem pohyblivé částice. Tato „částice“ se pak nazývá fonon.[wiki]

- **Vliv úhlu dopadu:** Veliký vliv na odrazivost resp. absorpci má úhel dopadu paprsku na obráběnou plochu. Efektivita úhlu dopadu závisí na elektrickém vektoru přichozícího paprsku a rovině polarizace. Polarizační rovinu chápeme jako rovinu dopadajících vektorů elektrického pole. Dle Brewsterova zákona světlo, které dopadá na rozhraní dvou prostředí je částečně odraženo zpět do prostředí původního a část světla se lomí do prostředí druhého. Dle teorie elektromagnetického pole převládají v odražené části paprsku kmity kolmé k rovině dopadu (světlo částečně polarizované nebo, v závislosti na Brewsterově úhlu, světlo zcela polarizované), kdežto v lomené části paprsku převládají naopak kmity ležící v rovině dopadu. Zcela polarizovaný odražený paprsek je tehdy, dopadá-li pod tzv. Brewsterovým úhlem Φ_B , a je v pravém úhlu s paprskem lomeným, jak je znázorněno na obr. 1.20. Pokud nastane tato situace, je pro elektrický vektor v rovině dopadu nemožné, aby byl odražen, protože s ním není žádná jiná složka v pravém úhlu. Tudíž odražený paprsek bude mít elektrický vektor pouze v rovině, která je kolmá na rovinu dopadu. V tomto úhlu je úhel lomu $= (90^\circ - \text{úhel dopadu})$, a proto podle Snellova pravidla je index lomu $n = (\tan \Phi_B)$. Každý paprsek mající pouze jednu rovinu pro elektrický vektor je nazýván polarizovaný (10, str.70). Některé hodnoty indexu lomu kalkulované z Brewsterova úhlu jsou pro různé materiály a různé vlnové délky dopadajícího paprsku k vidění v tab. 1.3. Je-li úhel dopadu roven polarizačnímu úhlu, jsou odražený a lomený paprsek vzájemně kolmé. Z teorie elektromagnetického pole lze dokázat, že při polarizaci lomem je lomený paprsek polarizován pouze částečně. V lomeném paprsku převládají kmity ležící v rovině dopadu (9). Je-li rovina polarizace shodná s rovinou dopadu (vektory elektrického pole paprsku jsou rovnoběžné s rovinou dopadu), potom říkáme, že paprsek je paralelní a polarizaci označujeme jako p-polarizaci (p=parallel). To způsobí, že vibrace elektronů jsou náchylné ke střetávání se s povrchem a absorpce je tudíž vysoká. Naopak, svírá-li rovina elektrického vektoru pravý úhel s rovinou dopadu, potom paprsek označíme jako kolmý a polarizaci označíme jako s-polarizaci (s=senkrecht). Následkem tohoto je, že vibrace elektronů mohou projít povrchem bez jakéhokoli střetu s povrchem a absorpce je tudíž malá. Výše uvedené poznatky jsou ilustrovány na obr. 1.19.



Obr.1.19 Polarizace (15): a) Vektor el. pole je kolmý na rovinu dopadu (s-polarizace), **b)** Závislost odrazivosti na úhlu dopadu pro kovy



Obr. 1.20 Příklad polarizace příchozího paprsku a Brewsterova úhlu (9)

Tab. 1.3 Hodnoty indexu lomu a Brewsterových úhlů pro vybrané materiály (10)

Material	λ	Refractive index		Brewster angle
		k	n	
Al	1.06	8.5	1.75	60.2
	10.6	34.2	0.108	88.3
Fe	1.06	4.49	3.81	75.2
	10.6	32.2	5.97	88.2
Ti		3.48	2.88	70.8
Glass		-	1.5	56.3

- **Vliv materiálu a drsnosti povrchu:** Drsnost povrchu má rozsáhlý efekt na absorpci v důsledku rozmanité odrazivosti od nerovností povrchu. Může se zde vyskytovat také tzv. „stimulovaná absorpce“ vlivem interference paprsku s vedlejšími odraženými paprsky. Za předpokladu menší drsnosti povrchu, než je vlnová délka paprsku se bude záření chovat jako při dopadu na rovinu bez drsností.

V dalším textu si alespoň krátce popíšeme jevy, které také úzce souvisí s interakcí laserového paprsku s materiálem. Výše jsme si uvedli a obeznámili se s problematikou absorpce (pohltivosti) a reflexe (odrazivosti) materiálu. Neopomenutelnými jevy jsou také ale lámání světla při průchodu opracovávaným materiálem a dále potom difrakce (ohyb) paprsku.

Lom světla je nejužitečněji popsán Snellovým pravidlem: “Lomený paprsek leží v rovině dopadu a sinus úhlu lomu přináší konstantní vztah ku sinu úhlu dopadu” (10, str.71):

$$\sin\Phi / \sin\phi = n = v_1 / v_2 \quad (1.13)$$

kde n = index lomu, Φ = úhel dopadu, ϕ = úhel lomu, v_1 = zdánlivá rychlost šíření v médiu 1, v_2 = zdánlivá rychlost šíření v médiu 2.

Zdánlivá změna rychlosti světla při průchodu médiiem je důsledkem rozptylu paprsku jednotlivými molekulami materiálu, jimiž mohou být také různé cizorodé molekuly vměstků či nečistot. Rozptýlené paprsky se střetávají s primárním paprskem způsobujíc zpoždění fáze. Podrobný rozbor problematiky lomu světla, jeho ohybu a rozbor jevu rozptylu a jeho druhů včetně empirických vztahů je uveden v (10).

V závěru této podkapitoly je třeba zmínit fakt, že optické jevy, jež byly popsány výše jsou lineární. Lineární efekty byly vybrány z důvodu snadnějšího pochopení řešené problematiky. Když světlo působí na materiál, materiál reaguje tomuto světlu úměrně. Tudíž vznikají lineární efekty odrazu, lomu, rozptylu a absorpce světla a všechny nastanou při stejné frekvenci (frekvence světla zůstane procesem nezměněna).

Základy nelineární optiky položili vědci Peter Franken a kol. roku 1961 na Michiganské univerzitě, kdy soustředili paprsek vysoce výkonového rubínového laseru (červené světlo) na křemenný krystal, čímž vygenerovali ultrafialové záření v kombinaci s „prosáklým“ světem. *V dnešní době je mnoho, pro náš běžný život, elektro-optických zařízení závislých na nelineárních optických efektech. Tyto efekty zahrnují: Druhou harmonickou generaci (Second Harmonic Generation - SGH), jak pozoroval Franken a jeho kolegové, optickou korekci, Pockelův elektro-optický efekt, součet a rozdíl smíšených frekvencí, Kerrův elektro-optický efekt, třetí harmonickou frekvenci, všeobecné míšení dvou vln, optický Kerrův efekt, stimulovaný Brillouinův rozptyl, stimulovaný Ramanův rozptyl, fázová konjugace, samozaostření, modulace vlastní fáze, absorpce dvou fotonů, ionizace a emise* (10). Podrobnější popis nelineárních optických efektu lze nalézt v (10).

1.4.1 Parametry laserového paprsku

- **Mód a Průměr paprsku (mode and beam diameter):** Jak již bylo zmíněno, laserová dutina je optický rezonátor. Při jeho oscilaci vzniká v dutině stojaté elektromagnetické vlnění definované geometrií dutiny (průměr paprsku je dán rozmery dutiny). Bylo zjištěno, že v takovéto situaci se v dutině vyskytuje několik podélných stojatých vln o mírně odlišných úhlech. Počet těchto vyosených vln souvisí s tzv. Fresnelovým číslem ($a^2/\lambda L$). Tyto stojaté vlny se vzájemně střetávají, přičemž se tvoří příčná stojatá vlna, což při východu vlny z dutiny rezonátoru pozorujeme jako režim struktury paprsku (způsob konstrukce paprsku). Pro válcovou dutinu bez zesilovače je amplituda v určitém bodě, který je určen souřadnicemi r (poloha radiální) a Φ (poloha úhlová), příčné stojaté vlny dána vzorcem $E(r, \Phi)$ dle Laguerre-Gaussianove Distribuce Funkce. Intenzita distribuce (rozdělení) $P(r, \Phi)$ je dále pak dána kvadrátem amplitudy příčné vlny v bodě r, Φ .

Toto jsou klasické způsoby rozdělení pro kruhový paprsek. Pro čtvercový paprsek lze odvodit rozdělení obdobně s tím rozdílem, že ve vyjádření funkce $E(r, \Phi)$ bude namísto polynomu Laguerrova vystupovat polynom Hermitův. Graf amplitudy a prostorového rozložení intenzity, který toto vyjádření reprezentuje pro různé uspořádání režimů je vykreslen na obr. 1.21. Typické vzory módů, které mohou být z takovýchto paprsků vytvořeny jsou znázorněny na obr. 1.22.

Klasifikace typů těchto příčných elektromagnetických režimů (Transverse Electromagnetic Mode = TEM_{plq}) je takováto:

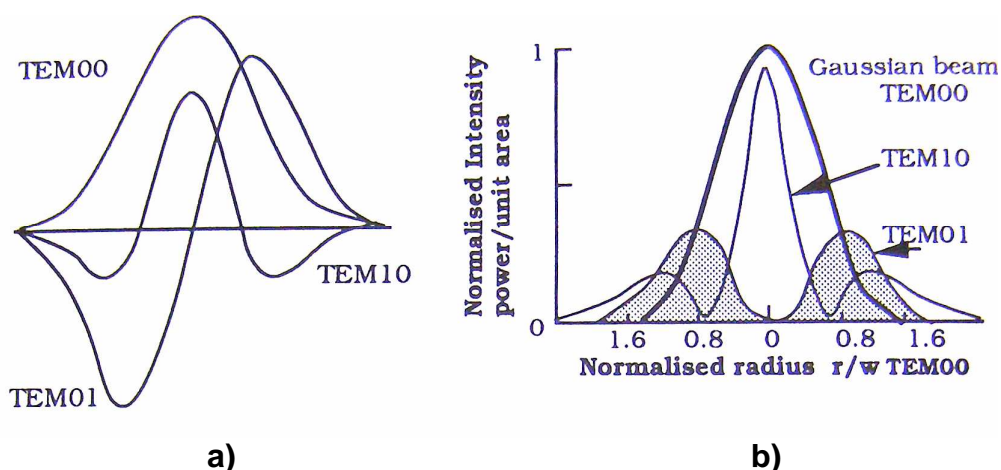
- p = počet nulových radiálních polí
- l = počet nulových úhlových polí
- q = počet nulových podélných polí

Nejvíce laserů s pomalým průtokem (Slow Flow lasers = SF) pracuje v téměř dokonalém režimu TEM_{00} a TEM_{01}^* , kde TEM_{01}^* režim je tvořen oscilací mezi dvěma ortogonálními režimy TEM_0 a TEM_1 jak je ilustrováno na obr. 1.22.

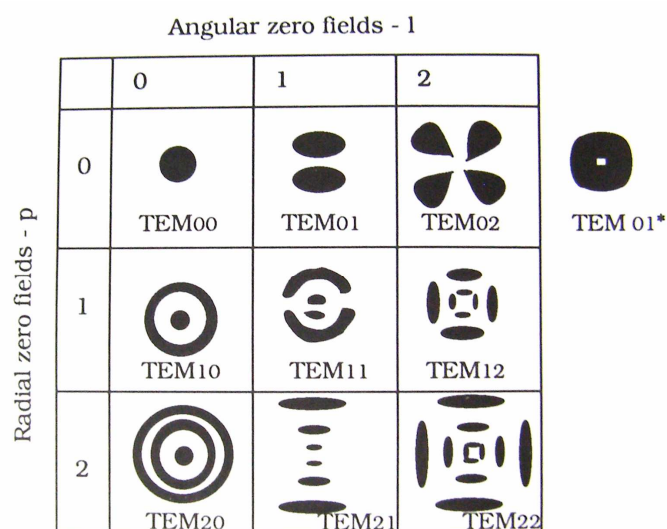
Nejvíce laserů s rychlým osovým průtokem (Fast Axial Flow lasers = FAF) generují paprsky s horším uspořádáním režimu protože mají dlouhou rovnou trubici a tím pádem nízké Fresnelovo číslo ($a^2/\lambda L$). Režimy těchto laserů mohou být mírně zkreslené díky různým hustotám plazmatu.

Lasery s příčným průtokem (Transverse Flow lasers) mají obvykle multi-režimové paprsky s kolísavým seřazením. Oba jsou kvazi-Gaussiánské v tom smyslu, že mají jednotný výkon, jsou obvykle asymetrické vlivem příčného zesílení lišícího se napříč dutinou vlivem ohřevu plynu. Čím vyšší je pořadí režimu, tím složitější je zaostřit paprsek do malého bodu.

Při obrábění materiálů přichází v úvahu otázka, co je to vlastně průměr laserového paprsku. Vezměme si například obr. 1.21a a obr. 1.21b, které byly oba spočteny a sestaveny pro stejný matematický rádius $w(z)$. To samozřejmě nesouvisí s диаметром, který způsobuje teplotní procesy v materiálu. Existují pádné argumenty, že průměr paprsku by měl být definován jako vzdálenost, na níž klesne totální výkon paprsku na hodnotu $1/e^2$ (10, str. 77).



Obr. 1.21 Příklady režimů TEM (10): a) Rozdíly amplitudy pro různé režimy TEM b) Rozdělení intenzity pro různé režimy



Obr. 1.22 Typy módů (10)

- **Energie pulzu (pulse energy):** Energie dodaná do jediného impulsu je použita jako výchozí bod pro většinu výpočtů. S nejnovější generací napájecích zdrojů může být energie každého pulzu naprogramována na požadovaný profil, což umožňuje lineární zrychlení na začátku pulzu a postupné ochlazování na konci pulzu. Pulzní formování pomáhá zlepšit řízení procesu.
- **Hustota energie (power density):** Hustota energie je v podstatě mírou množství fotonů dopadajících na materiál. Je měřena v jednotkách W/cm^2 a je myšlena jako energie pulzu dělená plochou bodu dopadu paprsku. Připomeňme si, že laserové světlo se od běžného světla liší třemi zásadními rozdíly a těmi jsou: je koherentní, je vysoce monochromatické a je vysoce paralelní (urazí relativně velkou vzdálenost, aniž by se významně rozprostřelo). Právě paralelnost laserového paprsku má zásadní vliv na obrobitelnost materiálů, jelikož jej můžeme soustředit (optikou) do extrémně malého bodu a tím v tomto bodě hromadit velké množství energie, což vede k zahřívání, tavení a vypařování materiálu. *To umožňuje laseru o výstupním výkonu 1kW vytvořit hustotu energie v místě dopadu až $10^7 W/cm^2$, což je velmi vysoká hodnota dostatečná k tavení a odpaření převážné většiny substancí. Dle Stefan-Boltzmannova pravidla, které zní: černé těleso emituje elektromagnetickou energii jako funkci teploty. Tento vztah je dán Stefan-Boltzmannovým zákonem jako (15, str.67):*

$$W_B = \sigma T^4, \quad (1.14)$$

kde W_B = hustota energie (W/cm^2), σ = Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \times 10^{-12} W \cdot cm^{-2} \cdot K^{-4}$), T = absolutní teplota (K) (15).

Jestliže vezmeme toto vyjádření pro hodnotu 10^7 W/cm^2 , potom dostaneme $T = 36000\text{K}$ (15, str. 67). Nyní si vysvětlíme, co tyto ohromující teploty znamenají. Znamená to, že černé těleso o stejných rozměrech, jako má zaostřený paprsek světla, by mělo dosáhnout teploty také 36000K, aby bylo v rovnováze s příchozí energií. V reálných případech bude teplo přeneseno, což markantně zredukuje teplotu materiálu pod jeho hypotetickou rovnovážnou hodnotu.

Hustota energie se může lišit v závislosti na kvalitě laserového paprsku, která je označována jako M^2 a je mírou rozložení energie v paprsku. Dokonalý paprsek s hodnotou $M^2 = 1$ má v podstatě ostrý vrchol uprostřed s Gaussovým rozložením od středu směrem k okraji. Nízké hodnoty M^2 blíží se 1 (<1) jsou využívány pro mikroobrábění, zatímco vysoké hodnoty M^2 (30-100) jsou preferovány pro tepelné zpracování nebo aplikace svařování. Podrobná koncepce kvality paprsku je podrobně řešena v (10).

- **Doba trvání dopadu paprsku a rychlost opakování pulzu (pulse duration and repetition rate):** Časové rozmezí po které paprsek kontinuálně působí na povrch obráběného materiálu je definované jako Doba trvání dopadu paprsku. Převážná většina aplikací obrábění materiálů laserem je řízena v pulzním režimu. V takovémto režimu laser emituje energii v pulzech specifické doby trvání dopadu při definované frekvenci opakování. Aplikace, ve kterých laser pracuje v kontinuálním režimu (continuous wave = CW mode) jsou kupříkladu svařování, pájení nebo tepelné zpracování.
- **Vrcholový výkon (peak power):** I přes poměrně nízkou průměrnou spotřebu energie laseru může být vrcholová hodnota výkonu každého pulzu velmi vysoká. Vezměme jako příklad typický laser s výstupní hodnotou výkonu 10W, který může dosahovat vrcholové hodnoty výkonu na pulz až 5kW. Je to možné proto, že energie je do místa určení dodávána ve velmi krátkém pulzu. Vrcholový výkon může být vyjádřen jako energie pulzu podělená délkou jeho trvání. To znamená, že pulz, který má energetickou hodnotu 1J a je dodán do místa obrobení v čase 1ms, potom hodnota vrcholového výkonu bude 1kW. Vzhledem k tomu, že takto vypočtené hodnoty jsou průměrnými hodnotami vzhledem k době trvání jednoho pulzu, potom skutečné hodnoty vrcholového napětí by mohly být ještě větší, protože energie není jednotně dodána v průběhu doby trvání jednoho pulzu.
- **Průměr světelného bodu při dopadu (spot diameter):** Tento rozměr závisí na ohniskové vzdálenosti, vlnové délce, kvalitě paprsku, a průměru paprsku dle následujícího vztahu (29):

$$D_s = 2f\lambda M^2 / D , \quad (1.15)$$

kde f = ohnisková vzdálenost zaostřující čočky, λ = vlnová délka paprsku, M^2 = kvalita paprsku, D = průměr paprsku.

U excimerových laserů běžně platí špatná kvalita paprsku a proto nejsou dostatečně dobře zaostřeny do výše uvedeného bodu. Pro eliminaci tohoto nedostatku paprsek excimerového laseru prochází skrze umělou masku k vytvoření požadovaného profilu paprsku a jsou běžně využívány při mikroobrábění k leptání křemíkových čipů. Kromě vlnové délky, která je dána v okamžiku volby laseru jsou prakticky všechny ostatní parametry vzájemně svázány a je třeba je nastavit s velikou opatrností. Například změnou velikosti bodu dopadu paprsku pomocí čoček, které mají kratší ohniskové vzdálenosti, roste hustota energie, leč celkový výkon je tomuto úměrně snížen.

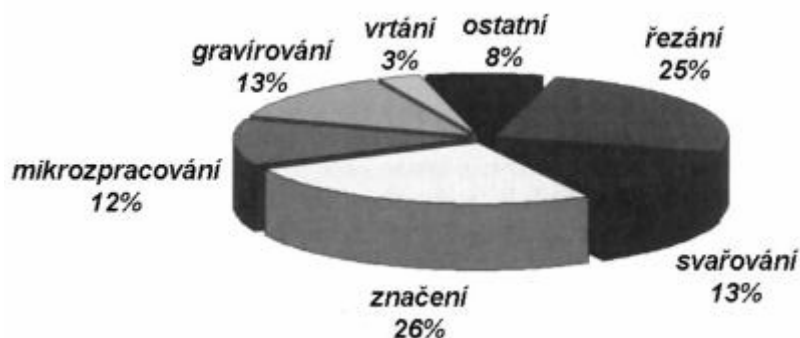
2. Využití laserů ve strojírenství

Od svého vzniku našel laser široké uplatnění v mnoha oborech. Jako pracovní nástroj je v dnešní době využíván kupříkladu v medicíně, automatizaci, technologii, astronomii, geodézii, metrologii, chemii, biologii, spektroskopii, v technice spojů, ve vojenské technice, v dálkovém řízení, energetice a ve výpočetní technice. Jak vidíme z tohoto základního výčtu – a jistě bychom našli i další disciplíny, kde je využit – je jasné, že laser je dnes velice významným a téměř neodmyslitelným nástrojem.

V technologii našel laser své uplatnění na konci 60. let minulého století. Díky neustálým inovacím prochází vývoj laseru a jeho aplikací neustálou obměnou vztaženou k novým technickým možnostem, příznivější ekonomice a provozu. *Základní předností laserových technologických operací je možnost opracování bez mechanického kontaktu s výrobkem, možnost opracování obtížně přístupných částí materiálu a technologické zpracování těžkoobrobitelných materiálů. Laserová technologie je nejčastěji definována jako opracování materiálu, které je založené na (2):*

- *Využití schopnosti laseru koncentrovat optickou energii v prostoru, čase a spektrálním intervalu;*
- *Interakci optického záření s látkou.*

Nejčastějšími aplikacemi laseru v oblasti technologické jsou především svařování, řezání, vrtání, tepelné zpracování, povrchové úpravy, gravírování, značení, metody Rapid prototyping a v neposlední řadě laserová podpora konvenčního obrábění. S těmito technologickými operacemi budeme obeznámeni v kapitole 2.2. *Při dnešní miniaturizaci výrobní a spotřební elektroniky a mikroelektroniky, procházející napříč celým hospodářským spektrem, patří technologie laserového mikroobrábění ke stěžejním výrobním postupům. Vývoj mikroobrábění laserem se zaměřuje na stále kratší pulzy a kratší vlnové délky až femtosekundových laserů. V tak krátkém pulzu, jehož doba trvání je i pod 100 fs, lze dosáhnout i špičkových výkonů větších než 15 GW a zajistit tak obrobitelnost veškerých materiálů (27).* Na obr. 2.1 můžeme vidět procentuální zastoupení výše uvedených technologických operací.



Obr. 2.1 Procento zastoupení jednotlivých technologií (2)

2.1 Rozbor laserů a laserových zařízení využívaných ve strojírenství

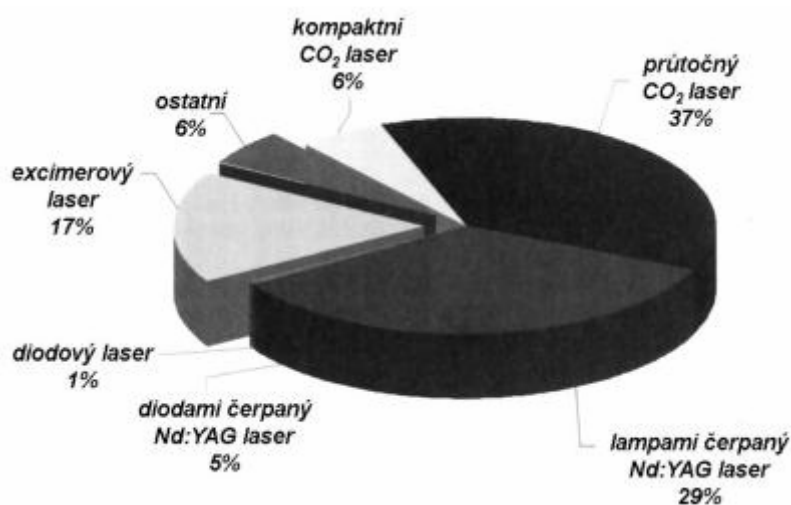
V současné průmyslové praxi se objevují stále nová konstrukční řešení laserů a s neustálým vývojem těchto technologií se na trhu objevují stále dokonalejší systémy. U veškerých těchto nových systémů jde především o snahu maximálního zvýšení kvality laserového paprsku a hustoty jeho výkonu v souladu se stále vyššími požadavky na náročnější trendy průmyslové výroby. Nejčastěji využívanými lasery v odvětví průmyslu jsou lasery plynové CO₂, pevnolátkové, diodové výkonové a lasery excimerové vzhledem k poskytovanému (relativně vysokému) výkonu laserového paprsku. Spojení laseru, robotiky a automatizace dává za vznik laserovým zařízením, popř. laserovým strojům. Dle (1) jsou v oblasti aplikace laserových technologií v obráběcích strojích zřejmé tři přístupy a těmi jsou:

- Na stávající obráběcí stroj je instalován vhodný typ laseru – tato kombinace nám umožňuje provádět třískové obrábění a laserové operace na jednom stroji při jednom upnutí obrobku;
- *Využití podstatné části obráběcího stroje (rámu a pracovních stolů, včetně řízení a pohonů) a doplnění laserem - toto uspořádání umožňuje provádění pouze laserových technologií (1);*
- Integrovaní laseru přímo do výrobní linky.

Trendy týkající se laserových strojů a technologií však směřují ku snaze vyvinout stroj či laser, který by byl schopen provádět více laserových technologií, jako např. leštění, mikrofrézování, kalení, vrtání malých děr apod. Dále si podrobněji přiblížíme lasery, které mají v průmyslové praxi největší využití a stejně tak se blíže seznámíme se stroji, které při obrábění využívají tyto lasery a laserové technologie.

2.1.1 Průmyslové lasery

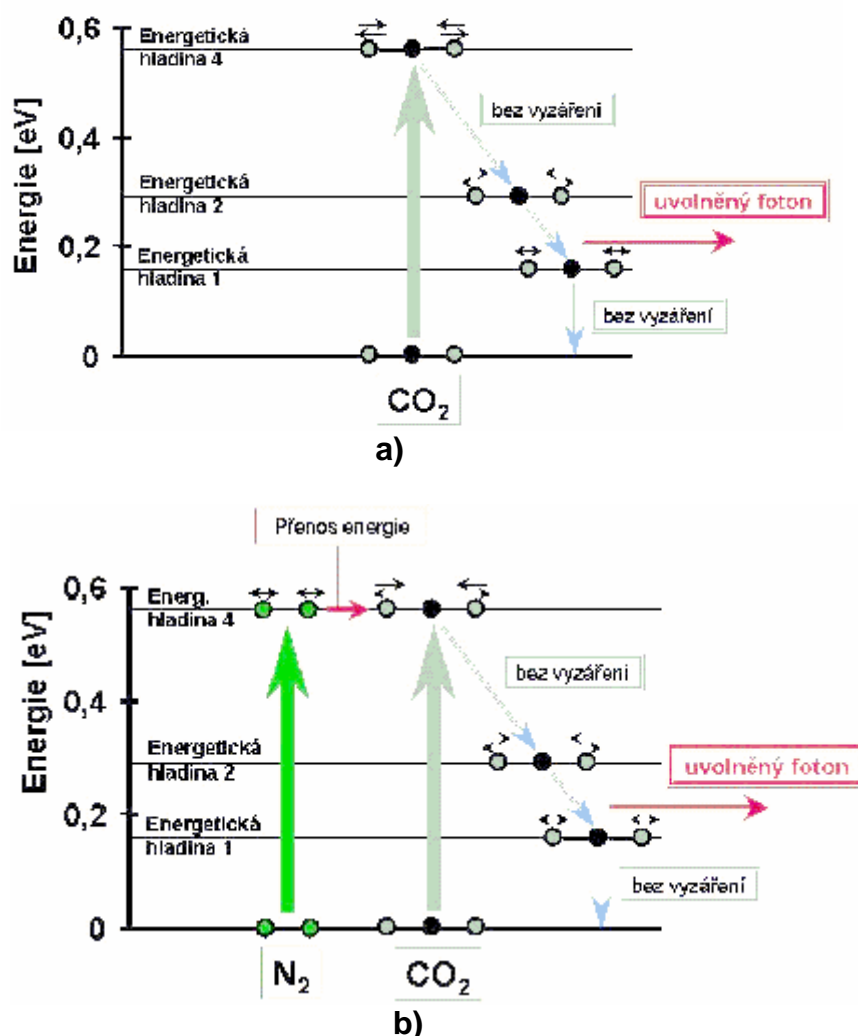
Uplynulé dva roky přinesly v ohledu vývoje laseru řadu nových aspektů vztahujících se jak na nové varianty laserů, tak i na jejich průmyslové aplikace a užití. *Přitom pro své odlišné fyzikálně-optické parametry má každá typová skupina laserů své speciální vlastnosti a uplatnění, pro konečnou volbu ze strany uživatele jsou často rozhodující i ekonomické ukazatele ve vztahu k pořizovací investici, provozním nákladům a sériovosti výroby*. Procentuální zastoupení jednotlivých druhů laserů je možné vidět na obr. 2.2.



Obr.2.2 Procento zastoupení jednotlivých typů průmyslových laserů (2)

2.1.1.1 Plynové CO₂ lasery

Patří k nejstarším typům laserů a jejich aktivní prostředí tvoří plyn oxidu uhličitého CO₂ vyzářující laserový paprsek o vlnové délce 10,6 μm . Do excitovaného stavu je vybuděn přívodem vnější energie (elektrický výboj, vysokofrekvenční výboj). Molekula CO₂ musí projít třemi energetickými hladinami, aby se dostala na hladinu 4 (obr.2.3a) excitovaného stavu. Při přechodu zpět na hladinu 1 je vyzářen foton. *U samotného CO₂, jako média, je velmi málo molekul, které se dostanou na hladinu excitovaného stavu. Ostatní molekuly, při dosažení nejbližší vyšší energetické hladiny tuto ihned opouštějí bez vyzáření světelné částice. K tomu, aby se zvýšil počet excitovaných molekul oxidu uhličitého během dodávky vnější energie, jsou za potřebí i ostatní plyny tvořící směs laserového média, jako dusík a helium (34). Molekuly těchto „přídavných“ plynů lze vybudit do excitovaného stavu stejným způsobem jako oxid uhličitý. První energetická hladina dusíku je na téměř stejné úrovni jako čtvrtá hladina u oxidu uhličitého, čehož se využívá k přenosu energie z excitované molekuly dusíku na molekuly oxidu uhličitého vzájemnými kolizemi a tím dosáhneme vyššího počtu excitovaných molekul oxidu uhličitého (obr. 2.3b) [linde]. Molekuly helia slouží k relaxaci (uklidnění) energie molekul oxidu uhličitého při přechodu z první en. hladiny do klidového stavu (základní hladiny) tím, že odeberou jeho tepelnou energii tak, aby je bylo možné opětovně excitovat. patří k nejvýkonnějším typům laserů vůbec.*

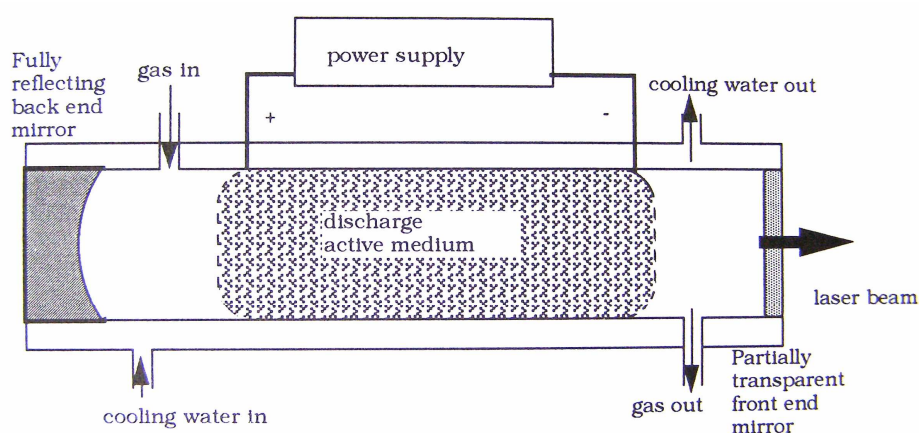


Obr. 2.3 Proces CO₂ laseru (34): a) Excitace molekuly CO₂, b) Interakce molekuly N s molekulou CO₂

Podstatou designu jednotlivých dioxin karbonových laserů je ochlazování plyné směsi CO₂ a dle režimu průtoku a čerpání plynu je lze podle (10) rozdělit na lasery průtokové a to:

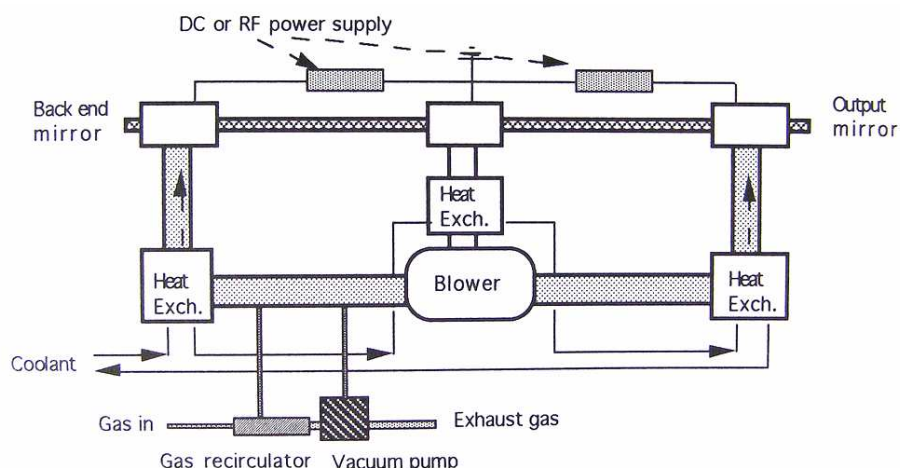
- **Lasery s pomalým průtokem (Slow Flow Lasers - SF):** U těchto laserů je ochlazování realizováno stěnami dutiny oscilátoru, kde chladicí látkou je voda. Základní konstrukci takového laseru vidíme na obr. 2.4. Typické hodnoty průtoku plynu jako aktivního média jsou 20 l/min při současném průtoku 7 l/min chladiva při 20 °C, přičemž získáme hodnotu výkonu 30-50 W/m. Výkon za jednotku délky závisí na účinnosti chlazení. Existuje jistá hranice vyšších teplot, při kterých nenastane činnost laseru, protože při těchto vyšších teplotách nižší energetická hladina nemůže být dostatečně rychle vyprázdněna do základního stavu (10, str. 20). Tudíž pro maximální výkon nás zajímají teploty ve středu

dutiny rezonátoru v systémech s pomalým průtokem nebo v pevnolátkových tyčích, jelikož právě v tomto místě dosahují nejvyšších hodnot. Poměr výkonu ku jednotce délky (W/m) je relativně malý a proto tyto lasery jsou málo výkonné (většinou do výkonu 2kW), nebo jsou fyzicky velmi dlouhé, aby zvládali vyšší výkony stejně tak, jako první výkonový laser tohoto druhu, který byl sestaven na Essexké univerzitě v roce 1960, jehož délka dosahovala 70 metrů. U tohoto typu výkonového laseru lze délku minimalizovat zahnutím či stočením dutiny rezonátoru. Dlouhé dutiny znamenají nízké Fresnelovo číslo (kap. 1.4.1). To má za následek neuspořádanost režimu záření, což je vlastně nejvhodnější forma pro fokusaci paprsku. Relativně jemné plazma, které se tvoří v pomalu proudícím plynu zajišťuje dobrý mód paprsku uspořádaným výkonem napříč dutinou a stejně tak i po její délce.



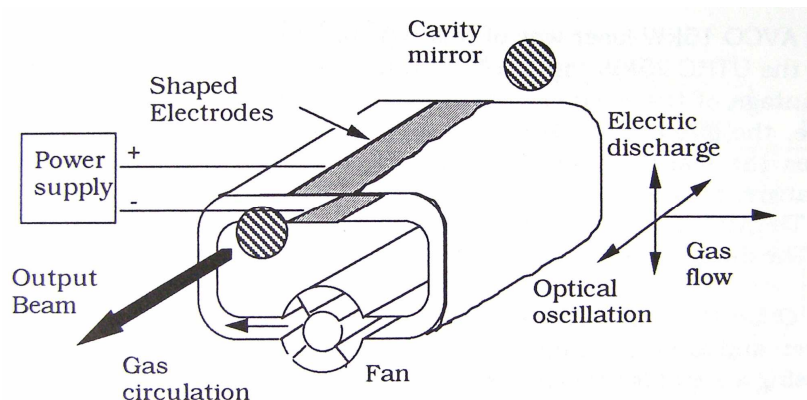
Obr. 2.4 Konstrukce CO₂ (SF) laseru (10)

- **Lasery s rychlým osovým průtokem (Fast Axial Flow Lasers - FAF):** U FAF laserů je chlazení tvořeno prouděním vlastního laserového média skrz oblast výboje a přes tepelný výměník. Základní vyobrazení FAF laseru je na obr. 2.5. Typická rychlost proudění proudu oblastí výboje je asi 300-500 m/s. Kontrolováním plynové směsi a zamezením jakéhokoli jejího úniku dovolí vzniknout jemnému plazmatu. Díky axiálnímu toku a oscilaci je rozložení energie v paprsku osově symetrické. Délka dutiny udává obvykle poměrně nízké Fresnelovo číslo, a proto je mód paprsku méně uspořádaný a tudíž lehčeji zaostřitelný do malého bodu na povrchu tělesa. Typický přírůstek výkonu těchto laserů je 500W/m. Je mnohdy desetkrát vyšší, než u systémů s pomalým průtokem a proto jsou využívány k sestavení vysoce výkonných kompaktních jednotek. Znovu uvedeme, že výstupní výkon laseru je závislý na účinnosti chlazení. V tomto případě fluidum vstupuje do dutiny chladné a vystupuje vlivem výboje horké. Hranice nečinnosti laseru nastane tehdy, když teplota na výstupu překoná mezní teplotu. Výkon je úměrný rychlosti a ploše průřezu dutiny. Mnoho krátkých laserů o velkém průměru dutiny produkuje vysoké výkony, ale jejich paprsek nemůže být dost dobře zaostřen kvůli vysokému číslu režimu nebo kvalitě M² paprsku.



Obr.2.5 Základní konstrukce CO₂ FAF laseru (10)

- **Lasery s příčným průtokem (Transverse Flow Lasers - TF):** Tyto lasery jsou opět chlazeny vedením. Laserové médium uvnitř dutiny rezonátoru proudí příčně, tedy kolmo vzhledem k ose dutiny jak je vidět na obr. 2.6. Chlazení je proto velice efektivní, a proto je tento typ laseru vysoce kompaktní a vysoce výkonový. Hlavní nevýhodou těchto laserů je to, že postrádají symetrii proudění. Plyn vstupuje do dutiny chladný a ohřívá se příčným průchodem činným prostorem. Tudíž výkon, který je funkcí teploty, napříč dutinou klesá a výsledkem je asymetrický výkon paprsku.



Obr. 2.6 Základní konstrukce CO₂ TF laseru (10)

Díky neustálému vývoji se setkáváme s lasery které mají různé charaktery proudění. Dnešní trh nabízí širokou nabídku typů plynových CO₂ laserů o širokém výkonostním spektru. Dle [MM] jsou CO₂ lasery se středním výkonem v rozsahu 500-6000W jsou využívány především pro řezání ocelových plechů do tloušťky 25mm, řezání profilů a trubek. Při menších tloušťkách je možnost řezání mosazi (t<8mm) nebo hliníku (t<15mm). Díky své vysoké flexibilitě a snadnému programování řezů jsou vhodné nejenom pro sériovou, ale také pro malé a středně velké série. Lasery s výkonem vyšším, než 6000W se nejčastěji využívají

při svařování u automatizované velkosériové výroby, kde běžně dosažená hloubka svaru činí 20mm. Při výkonech nižších, než 500W jsou CO₂ lasery používány pro obrábění nekovových materiálů, ale výjimku mohou tvořit tenké kovové profily, kde je možnost řezání či svařování.

Zajímavou novou technologii dělení křehkých materiálů, jako jsou např. sklo, keramika nebo polovodiče, CO₂ laserem umožňuje laser Jenoptik-Votan G, kde se využívá k dělení vnitřního pnutí materiálu. Po povrchovém naříznutí spáry laserem dochází k lomu až následným intenzivním ochlazením dílu s vyvoláním pnutí. Patentovaný způsob, označovaný TLS – Thermisches Laserstrahl Separieren, je rychlejší než ostatní postupy a na rozdíl od klasického laserového dělení dává povrch řezu zcela bez mikrotrhlinek (7). V posledních letech přichází na trh nový druh plynového CO₂ laseru „slab CO₂“, který se pyšní vysokou kvalitou paprsku, což umožňuje velice kvalitní řez s minimálním tepelným ovlivněním obráběné oblasti. Jeho buzení je vysokofrekvenční výboj. Typické jsou pro tyto lasery měděné velkoplošné elektrody s účinným způsobem chlazení. Společnosti zabývající se výrobou laserové techniky disponují „slab“ lasery od výkonu 100 W až do 8 kW. Lasery tohoto typu jsou např. vhodné pro mikrořezání a při jejich dostatečném výkonu se dosahovaná přesnost přenáší i do řezání silnějších plechů. Vysoká stabilita procesu a kvalita paprsku dávají pak možnost využívat při řezání i vyšších rezných rychlostí (7). Výjimkou na trhu nejsou ani TEA (Transversal Excitation at Atmospheric Pressure) CO₂ lasery, které jsou buzeny impulsním výbojem při dobré homogenitě excitace, čímž je získán paprsek o dobré kvalitě a vysoké energii. Délka pulzu TEA laseru je řádově ve stovkách nanosekund.

Velikou nevýhodou plynových CO₂ laserů je skutečnost, že oproti pevnolátkovým a diodovým nelze vést výstupní paprsek optickým vláknem do místa určení. Snahou eliminovat tento nedostatek vzniklo několik, jak je uvedeno v [MM], vzniklo několik univerzálních provedení s novou koncepcí, kdy je laser umístěn přímo na rameno kloubového robotu. To umožňuje zmenšit optickou cestu při nižším počtu původních zrcadel. Nejvhodnější laser pro tuto kombinaci lze vidět na obr. 2.7.



Obr. 2.7 Nízká hmotnost kilowattového CO₂ laseru Trumpf TruCoax (200 kg) dopomáhá lepší kombinaci s kloubovým robotem přímým umístěním laseru na rameno robotu (7)

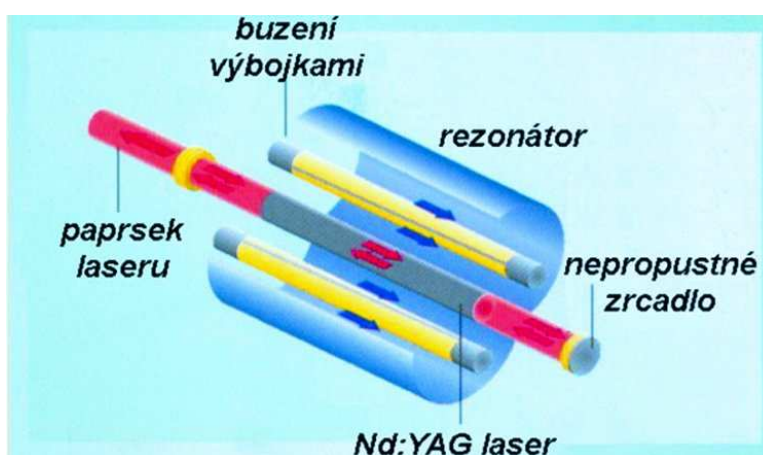
2.1.1.2 Plynové CO lasery

Tyto lasery nejsou běžně komerčně dosažitelné, ale designově jsou stejné, jako FAF systémy s přídatným chladícím systémem pro tekutý dusík nebo speciální chlazení. Některé konstrukce mají velmi kvalitní chlazení způsobené expanzí tlaku (Joule Thomsonovo chlazení), což ale vede k hlučnosti. Výstup CO laseru je velmi citlivý na teplotu. Pracovní teplota může být zvýšena přidáním xenonu (Xe) do plynné směsi. Tak či onak jsou výdaje srovnatelné s CO₂ lasery (10, str. 25).

2.1.1.3 Pevnolátkové lasery

Podstatou konstrukce pevnolátkových laserů je pumpování energie do laserového bloku a jeho chlazení, aniž by se tento blok zdeformoval nebo jakkoli jinak zničil. Obecný přehled laserů spadajících do této skupiny jsme si uvedli v kapitole podkapitole 1.3.1 a nyní se zaměříme na vybrané lasery, které našly své uplatnění v průmyslové praxi.

- **Lampami čerpaný Nd:YAG laser:** Základní konstrukce tohoto druhu laseru je ukázána na obr. 2.8. Aktivní prostředí tvoří bezbarvý a opticky izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu ($Y_3Al_5O_{12}$) kubické struktury, jenž je dopován ionty Neodymu (Nd^{3+}). Spadá do spektrální oblasti IR a emitovaná vlnová délka tohoto laseru se pohybuje v rozmezí 940 až 1440 nm, přičemž nejvyšší účinnosti dosahuje při vlnové délce 1064,1 nm. U těchto typů laserů se výkon v kontinuálním provozu pohybuje přibližně do 6 kW, v pulzním provozu se dá dosáhnout špičkových výkonů kolem 10^9 W a za užití kaskádových zesilovačů i vyšších (7).



Obr. 2.8 Konstrukce lampami čerpaného pevnolátkového Nd:YAG laseru (1)

Eliptická komora rezonátoru je většinou vyrobena ze zlata, kovu s povrchovou vrstvou nebo obyčejné keramiky. Keramická komora dává rovnoměrnější osvětlení tyči YAG krystalu. Uvnitř komory jsou instalovány kryptonové výbojky o souhlasném emisním spektru s Nd^{3+} . Na optické dutině je namontovaný otvor pro řízení módu paprsku a je možno také namontování Q-

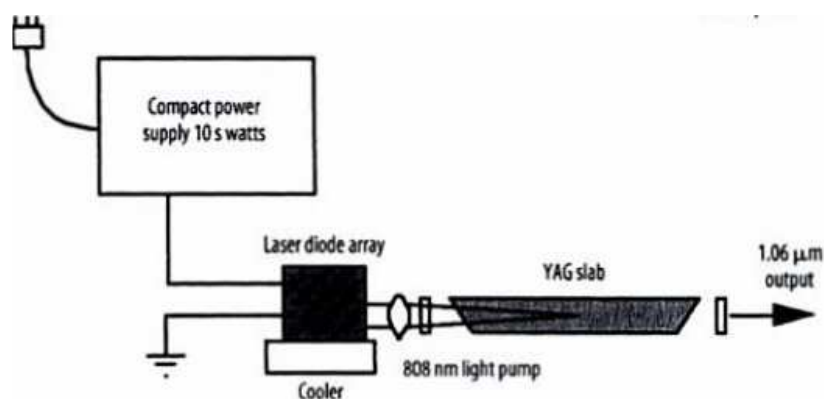
spínání pro rychlé clonění dutiny pro rychlé pulzy energie. Q- spínání (Q jako "quality") je zařízení, které zajišťuje modulaci jakosti rezonátoru. Může to být mechanický vibrátor, kapalina, která může být bělena, optoelektronická clona nebo akusticko-optický spínač. Zařízení akusticko-optického spínače generuje piezo elektrickým vysílačem zvukové vlny šířící se krystalovou mříží. RF oscilátor (24-27Hz) generuje zvukové vlny v krystalu. Tyto vlny jsou "zhuštěné" a "zředěné". Hustota těchto vln mění index lomu a proto krystal působí jako optická mříž, čímž způsobí odchyl paprsku od jeho původní dráhy. Tím pádem je činnost laseru zastavena. Okolo 60-100W je vyžadován odklon cca 60W paprsku, aby se Q-spínání ochladilo. Modulací těchto spínačů vzniká široký rozsah stupňů pulzů, běžně 0-50kHz (10, str. 27). Při potlačení činnosti laseru takovouto clonou vzroste v dutině energie a následným rychlým otevřením clony je dosaženo velmi vysokých špičkových výkonů. Například pro 20W Nd:YAG laser v režimu Q-spínání může vyprodukovat impuls o délce trvání 6ns o energii 1mJ, čímž dosáhneme špičkového výkonu 100kW. V průmyslu je využíván k řezání, vrtání, značkování, svařování či žhání. Je nejběžněji se vyskytujícím druhem laseru v průmyslových aplikacích, jelikož krystal YAG lze dobře opracovat do různých tvarů tyčí při zachování nejvyšší optické kvality. Pro nižší výstupní výkony paprsku Nd:YAG laseru lze paprsek nechat projít krystalem boritanu baria (BBO) nebo niobičnanu lithia (LBO), což jsou nelineární optické prostředky, které když jsou zaplaveny fotony, tak absorbují dva nebo více fotonů, aby se dostaly do vyšší energetické hladiny. Tato energie potom může být ztracena v jednom kroku, přičemž se vyzáří energii dvou fotonů o poloviční vlnové délce (10, str. 28). To znamená, že při průchodu paprsku o vlnové délce 1,06 μ m laseru Nd:YAG skrze uspořádaný krystal bude mít paprsek vlnovou délku 0,530 μ m nebo bude ve spektru viditelného záření jako zelené světlo. Toto je jev známý jako „zdvojování kmitočtu“, jehož opakováním získáme UV záření. Novinkami v poslední době jsou v kategorii pevnolátkových laserů obdobná provedení k základnímu typu Nd:YAG, ale s aktivním prostředím Yttrium Vanadičnanu (YVO4), Yttrium Lithia Fluoridu (YLF), Yttrium Aluminium Fosfátu (YAP), fosfáty či křemenné sklo. Dopujícími prvky pak mohou být různé prvky vzácných zemin jako jsou Nd, Er, Pr, Yb, Ho apod. Tabulka 2.1 uvádí některé typy komerčních pevnolátkových laserů. Změnou geometrie tyče krystalu aktivního prostředí získáme lasery kotoučové či lasery vláknové, o kterých bude krátce pojednáno dále.

Tab. 2.1 Vlnové délky vybraných komerčních laserů (10)

Laser type	Wavelength (μ m)							
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0
Holmium-YAG							*	*
Erbium-glass					*		*	
Nd-YAP		*	*	*			*	
Nd-YAG		***	*	***	*		**	
Nd-YLF		**	*	*			*	
Nd-silica glass		*	*	*			*	
Nd-phosphate glass		*	*	*			*	
Ti-sapphire			*	****	**	****	*	
Cr-alexandrite			***	*	*	*		
Cr-ruby			*		*			

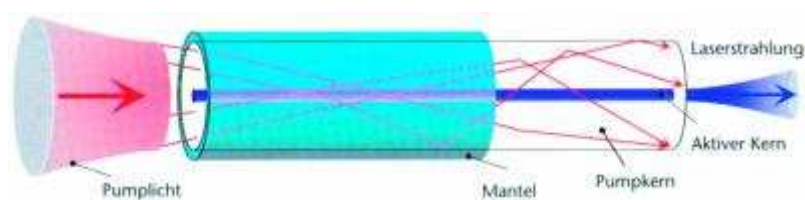
* Approximate region of principle wavelengths; each asterisk represents a lasing wavelength.

- **Diodami čerpaný Nd:YAG laser:** Mnohdy vzniká problém při čerpání Nd:YAG laseru výbojkami, protože pouze u několika málo procent ze sortimentu výbojek je jejich energie pohlcena ionty Neodymu a v takovém případě nelze dosáhnout požadované činnosti laseru. Přebytečná (odpadní) energie zahřívá tyč YAG a způsobuje přetvoření a změny indexu lomu. To vede k celkovému znehodnocení paprsku. Lampy mají životnost pouze několik málo stovek hodin a k vlastní funkci požadují hojný přísun elektrické energie. Právě tyto problémy řeší zavedení - jako náhrada excitace Neodymu lampami – diodových laserů. Schéma konstrukce takového laseru lze vidět na obr. 2.9. *Zásuvková efektivita diod je okolo 30-40% a veškeré jimi emitované světlo je soustředěno do absorpční linie Neodymu při vlnové délce 808nm. Dodávky energie a požadavky na chlazení jsou takto významně sníženy a kvalita paprsku M^2 dosahuje hodnot až 1,1 (10, str.28). Nevýhodou je vysoká cena vysoce výkonových diod, která mnohdy přesahuje cenu samotného Nd:YAG laseru.*



Obr. 2.9 Schéma konstrukce diodami čerpaného Nd:YAG laseru (16)

Jak již bylo uvedeno výše, změnou geometrie krystalu aktivního média lze získat koncepčně zcela vývojově odlišné lasery, kterými jsou lasery deskové (innoslab), kotoučové lasery (slab), ale především lasery vláknové, od nichž se očekává průlom v laserové technice. (Zde je třeba si připomenout, že na rozdíl od ostatních pevnolátkových laserů, kde optické vlákno slouží jen k přenosu už dříve generovaného paprsku od jeho zdroje na místo užití, u „vláknových“ laserů dochází ke generování záření až v jádru optického vlákna dopovaného prvky vzácných zemin.) (obr.2.10) (5).



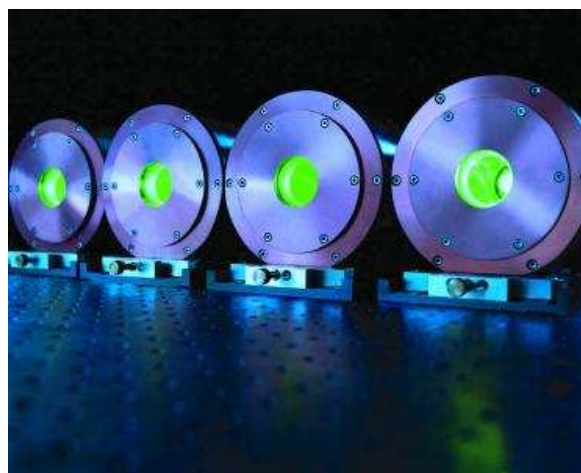
Obr. 2.10 Ukázka generování světelného paprsku u vláknového laseru (5)

U „innoslab“ laserů je krystal aktivního média v podobě desky, což dává dobrou možnost chlazení. Na trhu se tyto lasery objevují až do výkonů 200W a jejich největší předností je vynikající jakost paprsku, krátké pulzy a kompaktnost provedení. *Preciznost dosažených technologií dokládá jejich výrobce např. na postupu jakostního děrování otvorů v poměru délky k průměru až 300:1, a to jak při obrábění kovů, tak i plastů, skla a keramiky (5).*

Rychlý vývoj v oblasti pevnolátkových laserů je zaznamenáván u laserů kotoučových (obr. 2.12). Krystal aktivního média je ve formě kotouče o tloušťce řádově několika desetin mm a průměru pohybujícím se v rozmezí od jednotek mm do stovek mm. Je převážně dopovaný prvkem Ytterbiem (Yb). Malá tloušťka kotouče a zároveň dostatečná velikost přechodu v paralelním směru s generovaným paprskem příznivě působí na homogenní rozdělení teploty uvnitř paprsku a intenzitu chlazení. Takovéto uspořádání dosahuje dalšího pokroku v jemnosti zaostření paprsku a růstu hloubky ostroty paprsku. *Po ekonomické i technické stránce jsou lasery tohoto provedení s užší fokusací paprsku výhodné i pro možnost zvýšení pracovní rychlosti při technologiích řezání nebo svařování a tedy tím opět i snížení tepelného ovlivnění okolí řezu nebo svaru, u svarů pak zajišťují dobrou hloubkovou provařitelnost (MM).* Od původní hodnoty výstupního výkonu 1kW zaznamenaly do dnešní doby tyto lasery vzestup až na hodnoty 8kW a s přibýváním nových technologií a poznatků se dle výrobců dočkáme výkonů ještě vyšších. Velice často jsou vidět v kombinaci s výrobními roboty při svařování např. skeletů karoserií konvenčním postupem, ale také při svařování technologií „remote welding“ se skenováním zaostřeného paprsku (obr. 2.11a).

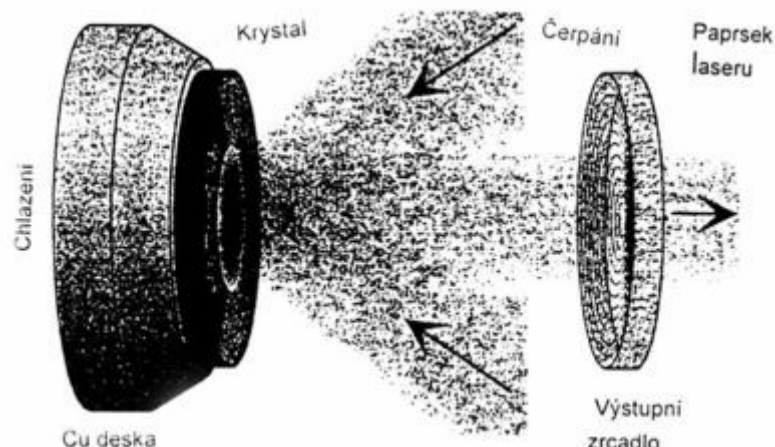


a)



b)

Obr. 2.11 Kotoučový laser (5): a) ve spojení s ramenem robotu („remote welding“) (4), **b)** v kombinaci s kontaktním chladičem



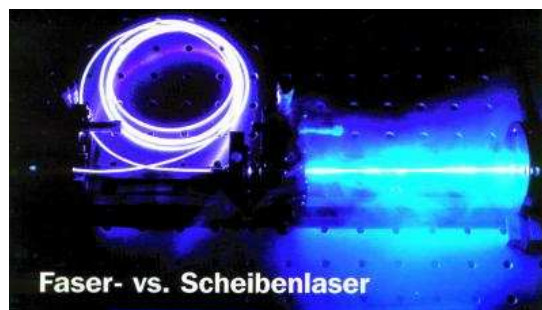
Obr. 2.12 Princip funkce kotoučového laseru (1).

Vyšší výkon kotoučových laserů dovoluje volit pro pracovní operace větší vzdálenost hlavice laseru od obrobku. Komerčně jsou dnes dostupné u firmy Trumpf kotoučové lasery do výkonu 8 kW (7). Teplo vzniklé pracovní činností laseru je odváděno napojením kotouče z jedné strany na celoplošný kontaktní chladič, přičemž i do velkých výkonů postačuje chlazení vzduchem (obr. 2.12).

Díky již dostatečně vysokému výkonu budících diod zaznamenává velmi rychlý vývoj vláknový laser, který byl donedávna uvažován spíše teoreticky. Ke generování záření dochází zde v jádru optického vlákna dopovaného prvky ze skupiny lanthanoidů. Nejčastěji se užívá erbia nebo ytterbia, případně obou těchto látek společně, častý je i praseodym. Optické vlákno těchto laserů v podstatě odpovídá svou funkcí úloze krystalu u pevnolátkových laserů, kde se optických vláken užívá jen k přenosu již dříve generovaného paprsku od místa jeho zdroje na místo užití. Kompaktní provedení vláknového laseru vyžaduje nízký příkon – jen 1 % oproti požadovanému příkonu u výbojkami čerpaných pevnolátkových laserů a vynikající je i kvalita paprsku. Při 100 W je možné dosáhnout fokusace paprsku pod 5 m, což představuje intenzitu záření přes 10^9 W/cm². Zajímavým řešením v oblasti vláknových laserů přichází i firma CeramOptec s laserem o výkonu 1,3 kW vyvinutým ve spolupráci s Institutem für Physikalische Hochtechnologie v Jeně, kde se dosahuje i fs pulzů. Takových parametrů se využívá kupř. při zpracování nových tepelně citlivých materiálů, materiálů s vysokou tepelnou vodivostí nebo i mikroprvků z paměťových slitin, kde tepelné ovlivnění, byť krátkým pulzem, může vést ke změně struktury a tedy i ke změně paměťových vlastností materiálů. V Jeně ověřovali tento laser např. při mikroobrábění karbidu wolframu. Obdobnou roli splňují i vláknové lasery pro popisování a gravírování, kde se využívá pulzních laserů s energií v pulzu 0,5 až 2 mJ při délce pulzu 30 až 100 ns. Pro jemné řezy v elektronice nebo u dílů medicíny se volí většinou vláknové lasery o výkonu od 50 do 200 W (7). Výhodou těchto laserů je vynikající kvalita paprsku a velmi dobré chlazení po celé délce vlákna.



a)



b)

Obr. 2.13 Ukázka činnosti a provedení vláknového laseru (27), (5):

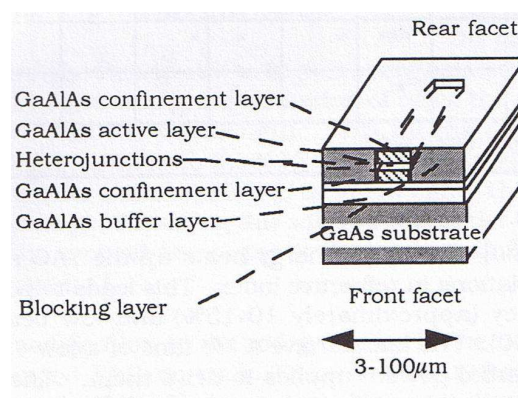
a) Vl. Laser při svařování, **b)** Ukázka několikametrového vlákna laseru chlazeného po celé délce

2.1.1.4 Diodové lasery

Diodové lasery založené na bázi polovodičů jako jsou InGaAs, GaAs nebo např. GaAlAs mají energetický odstup nebo jakési pásmo odstupu, přes které proudí elektrony. Energetická změna je uvolněna ve formě fotonů. Čistý GaAs laser má dle (10) energetický odstup 1,35eV při pokojové teplotě, čemuž odpovídá jeho vlnová 905nm. Tento proces může být stimulovaný a proto mohou pracovat jako lasery nebo jednoduše jako světlo vyzařující diody (LED). Základní konstrukci diodového laseru lze vidět na obr. 2.14.



a)



b)

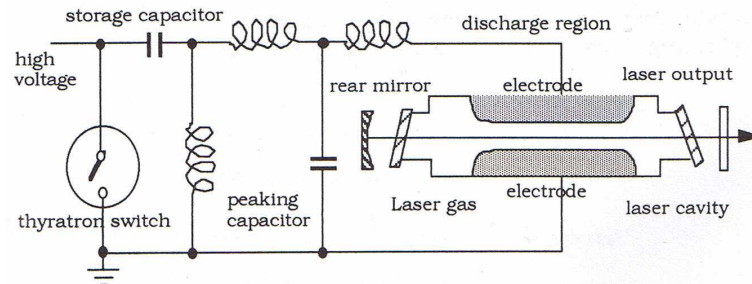
Obr.2.14 Diodový laser: a) Výkonový diodový laser DL 036R od firmy Rofin (7), **b)** Základní konstrukce laseru s horizontální dutinou (10)

Obr. 2.14b představuje dle (steen) diodový laser s horizontální dutinou, kde aktivní vrstva je tvořena směsí GaAlAs. Přední a zadní ploška tvoří rezonanční dutinu s hranovou emisí. Ve vazebných vrstvách je obsah Al vyšší. Dále lze vidět vrstvu blokovací, vrstvu tlumící a heteropřechod. Tyto lasery jsou malé a snadno poškoditelné výbojem el. proudu. Jejich životnost je závislá na množství difuze, kterou podstupují a tudíž na jejich teplotní historii. Lze říci, že tyto lasery čeká velká budoucnost díky jejich rozměrům a potenciálu levné masové produkce. Do nynější doby nejlepšími vyvinutými lasery jsou GaAs a GaAlAs emitující světlo o vlnové délce 750 a 870nm a laser InGaAs, který emituje světlo vlnové délky 900-1000nm. Výkon diodového laseru se zvyšuje s tloušťkou aktivních vrstev, jak je uvedeno na obr.2.14b. Laser s vrstvami jen několik mikrometrů širokými dokáže generovat v CW pracovním režimu výkon kolem 100mW. 50 μm široká vrstva dokáže generovat 0,5W a vrstva o šířce 500 μm výkon 4W. Souvislá lineární vrstva široká 10mm dokáže generovat CW výkon do 20W a v pulzním režimu dosahuje špičkový výkon dokonce 100W. Nakupením takovýchto vrstev lze dosáhnout kilowattových výkonů při relativně dobrém zachování malých rozměrů. Nevýhodou těchto laserů je vysoká divergence (30-40°), což připomíná spíše svítelné světlo, než laserové. Řešením tohoto problému se stal tzv. MOPA zesilovač (Master Oscillator / Power Amplifier). Toto zařízení je monolitické konstrukce a princip funkce je takový, že těleso hlavního oscilátoru generuje jednoduchý podélný mód paprsku, který je zesílen v prostoru zesilovače. Výstupní paprsek je větší formou vstupního a proto je mnohem lépe zaostřitelný. Diodových laserů do 250W je využíváno k řezání a svařování plastů a kovových fólií, případně k pájení. Při kW výkonech při vytváření, svařování s vedením tepla, natavování, a pájení natvrdo. *Diodové výkonové lasery mají dobrou účinnost, nízké investiční i provozní náklady i vysokou životnost. Odlišnou vlastností diodových laserů oproti jiným typům laserů je v zásadě pravouhý profil zaostřeného paprsku s téměř konstantním rozložením intenzity záření. U těchto laserů je možné poměrně snadné přeladování v širokém rozmezí vlnových délek, které se docílí změnou zastoupení jednotlivých prvků v polovodiči (7).* Stále největší využití ale nalézají v buzení jiných pevnolátkových laserů.

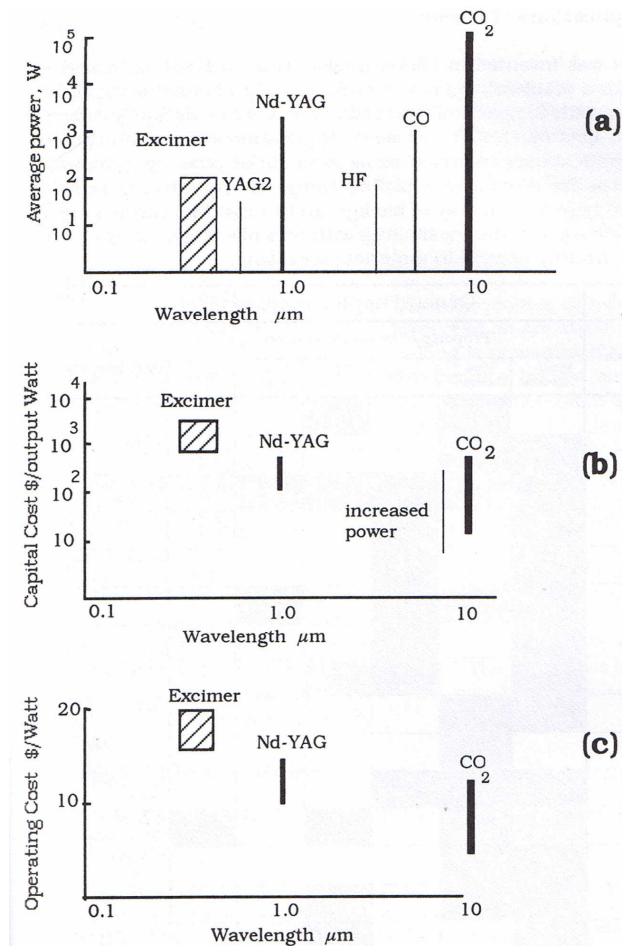
2.1.1.4 Excimerové lasery

Konstrukci průmyslového excimerového laseru lze dle (10) vidět na obr. 2.15. Excitace je způsobena vysokonapěťovým pulzem (35-50kV) při délce trvání cca 50-100ns skrz elektrody s vrcholovou hustotou proudu 1kA/cm². Aby se předešlo elektronové lavině (jiskření), je třeba materiál elektrod předionizovat na cca 10⁸ iontů/cm³. Toho je docíleno zaplavením dutiny ultrafialovým světlem vzniklým malou jiskrou v dutině. Vysoká energie fotonů ultrafialového světla dává velmi vysokou hustotu špičkového výkonu okolo 10MW-200TW/cm². Takovými hodnotám neodolá téměř žádný dosud známý materiál. Díky krátké vlnové délce a dobré fokusaci paprsku dovolují obrobení materiálů při zachování dokonale ostrých hran a tepelné ovlivnění okolního materiálu je minimální. Využívány jsou tedy pro mikroobrábění v rámci elektroniky a jemné mechaniky. Optika excimerového laseru je obvykle vyrobena z taveného křemíku, krystalického CaF₂ nebo MgF₂. Nepropustné zrcadlo rezonátoru má vysoce reflektivní Al nátěr – jako ochranu proti korozní atmosféře halogenových plynů. Propustné zrcadlo bývá

obvykle 8% reflektivní. Vlnová délka paprsku může být regulována změnou plynu aktivního média a velikost paprsku může být regulována průzorem u výstupu z dutiny. Plynné směsi excimerových laserů jsou obvykle složeny z Ha, Ar, Kr, Xe, He, Ne. Na jedno naplnění zásobovacího systému lze dosáhnout až 10^6 pulzů.



Obr. 2.15 Základní schéma excimerového laseru (10)



Obr. 2.16 Porovnání základních průmyslových laserů (10):

- a) Průměrný výkon (W),
 b) Cena (v dolarech) za 1 Watt výstupního výkonu (pouze přibližně),
 c) Pracovní náklady (v dolarech) za 1 Watt výkonu (pouze přibližně)

Tab. 2.2 Porovnává dva nejdominantnější lasery průmyslové praxe ve smyslu pohltivosti světla jednotlivých laserů různými materiály (34)

Materiál	Vlnová délka (mikrometry)	
	1.06 Nd:YAG laser	10.6 CO ₂ laser
Uhlíková ocel	výborná	výborná
Nerez ocel	výborná	výborná
Al-slitiny	dobrá	dobrá
Měď	dobrá	obtížná
Zlato	dobrá	neřezatelné
Ti-slitiny	dobrá	dobrá
Keramika	obtížná	dobrá
Akryláty	špatná	výborná
Polyetylen	špatná	výborná
Polykarbonát	špatná	dobrá
Dřevo-překliž	špatná	výborná

Tab.2.3 Rozdělení typů laserů se základními technickými parametry (19)

Zdroj	CO ₂ laser	Nd:YAG laser (buzený výbojkami)	Nd:YAG laser (buzený diodami)	Diodový laser
vlnová délka	10,6 mm	1,06 mm	1,06 mm	0,8 + 1,0 mm
účinnost	5 + 15%	2 + 5%	10 + 20%	30 + 55%
výkon	do 40 kW	do 6 kW	do 5 kW	do 6 kW
druh provozu	kontinuální/ pulzní	kontinuální/ pulzní	kontinuální/pulzní	kontinuální
intenzita v ohnisku	10 ⁶ + 10 ⁸ W/cm ²	10 ⁵ + 10 ⁷ W/ cm ²	10 ⁶ + 10 ⁸ W/ cm ²	10 ³ + 10 ⁵ W/ cm ²
přibližná cena	50 + 100 euro/W	75 + 150 euro/ W	100 + 175 euro/ W	80 + 100 euro/ W
typické aplikace	řezání, svařování	svařování, obrábění povrchu	svařování, obrábění povrchu	svařování, obrábění povrchu

Na závěr této podkapitoly bychom měli zmínit **laserové plyny a zásobovací systémy laserů**. Nezbytnou podmínkou při přeměně elektrické energie na laserové záření vznikající v rezonátoru laseru je vysoká čistota plynů. Již velmi nízký podíl nečistot v obsahu laserového plynu může mít katastrofický dopad na jeho životnost a výkon. Proto je nezbytné používat plyny potřebné čistoty předepsané výrobcem. Plyny laserové kvality potřebují odpovídající zásobovací

systém, přičemž nejdůležitějšími znaky kvalitního zásobovacího systému jsou: materiál potrubního rozvodu, druh spoje potrubního rozvodu, správně navržený tlak a průtok redukční stanice, kovové membrány v redukčních ventilech a stanicích, odvzdušňovací zařízení.

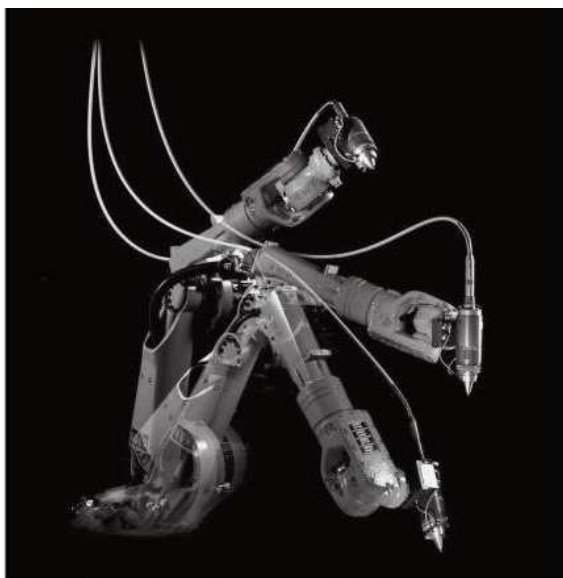
Výše zmíněnou problematiku v podrobné formě lze nalézt na stránkách předního uživatele laserové techniky Linde Gas a.s.

2.1.2 Laserová zařízení a stroje s laserem

V úvodu této kapitoly jsme si zmínili tři přístupy ku aplikaci laserových technologií na obráběcích strojích, kterými jsou:

- Na stávající obráběcí stroj je instalován vhodný typ laseru – tato kombinace nám umožňuje provádět třískové obrábění a laserové operace na jednom stroji při jednom upnutí obrobku;
- *Využití podstatné části obráběcího stroje (rámu a pracovních stolů, včetně řízení a pohonů) a doplnění laserem - toto uspořádání umožňuje provádění pouze laserových technologií (1);*
- Integrovaní laseru přímo do výrobní linky.

V současné době lze realizovat různé kombinace obráběcího stroje a laseru a stejně tak mají své pevné místo v řadě technologických procesů průmyslové roboty, na jejichž ramenou jsou instalovány laserové technologie, což je možno spatřit na obr.2.17 a obr. 2.11. Nesmíme zapomenout ani na klasické čistě laserové stanice, které jsou využívány k méně náročným, ale i těm nejnáročnějším technologickým aplikacím. V následujícím textu si ukážeme několik variant takovýchto strojů a zařízení.



Obr. 2.17 6-osý robot určený pro aplikace řezání využívající paprsek vláknového laseru a vybavený řezací/svařovací hlavou pro obrábění 3D součástí (14)

Šance dosud uvedených typů laserů užívaných u robotizovaných pracovišť jsou velice vyrovnané, i když pevnolátkové (většinou Nd:YAG lasery o $\lambda=1064\text{nm}$) a výkonové diodové lasery ($\lambda=808-940\text{nm}$) mají proti CO_2 laserům ($\lambda=10,64\mu\text{m}$) výhodu ve schpnosti přenosu paprsku od jeho zdroje až do místa určení optickým vláknem a samotné diodové lasery mají oproti ostatním laserům výhodu v mnohem menších rozměrech a menší hmotnosti. Při volbě laseru je zapotřebí vycházet z potřeb konkrétní technologie a uvažovat působení paprsku na obráběný nebo jinak zpracovávaný materiál a absorpci či reflexi paprsku. Laserové technologie obrábění materiálů uvedené v této kapitole budou podrobněji probrány v kapitole 2.2.

Kombinaci obráběcí stroj-laser lze realizovat následujícími způsoby (1):

- soustruh - obrábění s předehřevem (obrábění keramiky a ostatních těžkoobrobitelných materiálů);
- soustruh - kalení, popisování, gravírování;
- soustruh - výroba úzkých drážek, kalení, popis, odstraňování otřepů;
- soustruh - nanášení materiálu metodou Rapid Prototyping (např. výroba osazeného pouzdra z polotovaru ve tvaru trubky);
- frézka - kalení, mikrofrézování, popisování;
- frézka - mikrofrézování, odstraňování otřepů, leštění, kalení;
- frézka - frézování úzkých drážek, vrtání děr malého průměru;
- frézka – popisování.

Je zcela zřejmé, že v dnešní době je již možné vyhovět nejrůznějším přáním zákazníka a sestavit tak nejrůznější kombinace obráběcího stroje a laseru. Příkladem takovéto kombinace je např. obráběcí centrum MCVL 1000 Laser s vestavěným laserem o výstupním výkonu 50W společnosti Kovošvit MAS, a. s. nebo nástrojářská frézka FNG 50 CNC Laser vytvořená společností INTOS, s. r. o., Žebrák (obr. 2.18).



a)



b)

Obr. 2.18 Kombinace obráběcí stroj-laser (1): a) Obráběcí centrum MCVL 1000 Laser s vestavěným laserem o výstupním výkonu 50W, b) Nástrojářská frézka FNG 50 CNC Laser

Základní rozdělení strojů s lasery je dle prostorovosti jejich pracovní činnosti a těmi jsou 2D a 3D laserové stroje. Laserová hlavice těchto strojů se dále může pohybovat v několika osách a potom jsou to stroje dvou až šestiosé. Časté uplatnění nalézají na poli leteckého a dopravního průmyslu. *Pro vysoce náročné aplikace v leteckém průmyslu, jako je např. výroba bloků leteckých motorů, je vyžadován stroj s vysokou přesností a opakovatelností stopy paprsku v celém pracovním prostoru. Jsou požadovány navíc malé poloměry řezů a otvorů, řádově v oblasti 1÷2mm, vrtání otvorů, kde vstup paprsku může být i pod ostrým úhlem k povrchu dílu (8).* V tomto odvětví se často zpracovávají nejkvalitnější materiály a přístupnost k místu řezu bývá často velmi složitá navíc může být povrch dílu pokryt termálně izolující vrstvou, která nesmí být porušena paprskem. Typickými aplikacemi jsou: *řezání - spalovací komory, tepelné kryty leteckých motorů, 300 ÷ 500W Nd:YAG laser s vysokým výkonem v pulzu, cca 30 kW; vrtání otvorů malého průměru, s ostrým úhlem k povrchu ve spalovací komoře motoru, 300 ÷ 500W Nd:YAG laser s vysokým výkonem v pulzu, cca 30 kW (8); Jsou nejčastěji vykonávány 3D lasery, kde laserové médium je klasicky tvořeno bází Nd:YAG s výkony do 500W. Pro rotační tvary obráběných součástí se běžně používá vhodný rotační stůl.*

Dalším typickým odvětvím, kde je laser hojně využit je automobilový průmysl. Jejich častou aplikací je řezání a svařování karosérií, jejichž rozměry často přesahují 1m. Při svařování karosérií při kompletaci vozů je potřebný pohyb laseru v prostoru odpovídajícím rozměrům vozu. Typickými aplikacemi jsou: *Svařování střešních švů karoserie pro zvýšení tuhosti, 2÷6kW CO₂ laser; řezání a svařování podběhů pro vysokou kvalitu, 1÷6kW CO₂ laser; řezání karoserie, 1,5÷2kW CO₂ laser (300÷500W Nd:YAG laser); svařování výlisků a dílů pro zvýšení tuhosti, 2÷6kW CO₂ laser; svařování dveří a řezání dveřních výztuží, 2÷6kW CO₂ laser; svařování ozubených kol pro vysokou kvalitu a produktivitu, 2÷6kW CO₂ laser; svařování zdvihu ventilů, 2÷6kW CO₂ laser; řezání a svařování výfuků a výfukových potrubí, 2÷6kW CO₂ laser (300W Nd:YAG laser); řezání a svařování vnitřních dílů stropu, 150W Nd:YAG laser; řezání a perforování airbagů, 1÷2kW CO₂ laser; výroba prototypů, 1,5÷2kW CO₂ laser (300÷500W Nd:YAG laser) (8).*

Pro tyto aplikace je nejhojněji využíván CO₂ laser o výkonu 1,5-6kW. Častým jevem je, že se do pracovního prostoru laserového stroje vkládá více obrobků najednou, aby bylo dosaženo větší pracovní efektivity. Pro některé aplikace je výhodné použít Nd:YAG laser, kdy je paprsek vláknem přiveden k řezací či svařovací hlavě nesené ramenem robotu pro obrobění těžko dostupných míst. Za stejným účelem může být přiveden výkon CO₂ laseru uzavřenou trubkovou soustavou a zrcátky, lze využít univerzálnosti robotu (obr. 2.17) či spolupráce více robotů. Při obecném obrábění (řezání, svařování apod.) plochých rovinných dílů je nejčastěji aplikován CO₂ laser o výkonech 1,5 až 5 kW. Stoly laserových strojů jsou normalizovány od velikostí 1x2m až do velikostí 6m. *Stroje mohou být podle požadavků na produktivitu vybaveny zařízením pro manipulaci s materiálem, např. výměnnými stoly, jeřáby, automatizovanými zásobníky materiálu atd. Jedná se v zásadě o standardní vyladěná a optimalizovaná řešení s vysokým výkonem (8).* Dále si pro představu uvedeme několik takovýchto strojů od předních světových výrobců.

Laserové svařování a řezání jsou dnes spolehlivě nejrozšířenějšími laserovými technologiemi. Společnost PRIMA North America, Inc. vyvinula obráběcí centrum, které pracuje jak v režimu 2D, tak i v režimu 3D a je schopné provádět operace jak řezání, svařování, tak i vrtání. Je to pouze 5-osý stroj s přídatnou F-osou pro automatické stanovení pozice pro fokusaci paprsku (obr.2.19). Dalším ze série univerzálních 2D/3D strojů od společnosti PRIMA North America, Inc. je 5-osý model zvaný Optimo (obr.2.20), který se svojí rozlohou pracovního prostoru bezmála 11m³ řadí k největším laserovým strojům vůbec. Uplatnění nalézá především při obrábění rozměrných 3D součástí. Technické parametry strojů Optimo, Domino a mnoha dalších lze nalézt na stránkách výrobce.

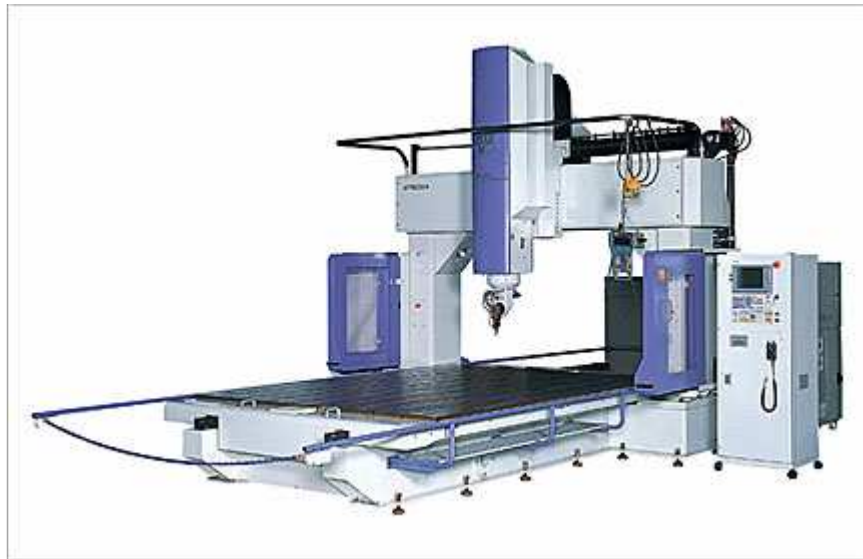
Neméně významnou v odvětví výroby laserových obráběcích strojů je firma Mitsubishi MC Machinery Systems, Inc., v jejímž sortimentu lze nalézt kupříkladu 3D modely VZ1 Series, VZ2 Series (obr.2.21) nebo 2D modely HV Series, LVPlus II Series a další, umožňující provádění základních laserových operací. U převážné většiny těchto strojů je laser (Nd:YAG, CO₂ aj.) integrován dodatečně ve formě laserové hlavy dle volené technologie laserového zpracování. Technické parametry pro představu nejaktuálnějších a nejmodernějších strojů lze opět nalézt na stránkách výrobce.



Obr. 2.19 3D/2D Obráběcí laserové centrum Domino od společnosti PRIMA North America, Inc. s integrovanou laserovou hlavou (Nd:YAG, CO₂ aj.) volenou dle aplikace (21)



Obr. 2.20 3D/2D 5-osé Obráběcí laserové centrum Optimo od společnosti PRIMA North America, Inc. s integrovanou laserovou hlavou (21)



Obr. 2.21 3D Obráběcí laserové centrum VZ2 Series od společnosti MC Machinery Systems, Inc. (20)



Obr. 2.22 2D 5-osé obráběcí centrum LVPlus II Series od společnosti MC Machinery Systems, Inc. , pracující s laserem plynovým CO₂ (20)

Značnou část na poli laserového zpracování materiálů v průmyslové praxi zaujímají technologie značení, gravírování (mikrofrézování) a mikroobrábění. Výrobou a rozvojem těchto strojů se u nás zabývá společnost Medicom a.s. V jejím sortimentu lze nalézt řadu variant a modifikací laserových popisovacích stanic, laserů gravírovacích, řezacích a samostatných popisovacích. Základní modely se rozdělují dle použitého zdroje laserového záření na: vláknové (fiber) lasery ytterbiové, pevnolátkové Nd:YAG lasery a plynové lasery CO₂. Volba správného typu laseru se v první řadě odvíjí a je dána konkrétní aplikací nebo cílovým odvětvím použití. Tyto lasery jsou vyráběny v rozsahu výkonu 20-120W.



a)



b)



c)

Obr. 2.23 Laserové popisovací stanice od společnosti Medicom a.s. (18): a) L.P.S. LASERdiode II LDII50C s Nd:YAG laserem, b) L.P.S. LASERfibre LF20C s vláknovým laserem, c) Stolní L.P.S. LASERfibre LF20T s vláknovým laserem



a)



b)



c)

Obr.2.24 Samostatné popisovací lasery v rozsahu výkonu 20-120W od společnosti Medicom a.s (18): a) LASERfibre LF20S - vláknový laser, b) LASER diode LDI15S - diodový Nd:YAG popisovací laser, c) LASERmark LM20S - CO₂ popisovací laser



Obr. 2.25 Deskový gravírovací CO₂ laser - portálového typu A1 (18)

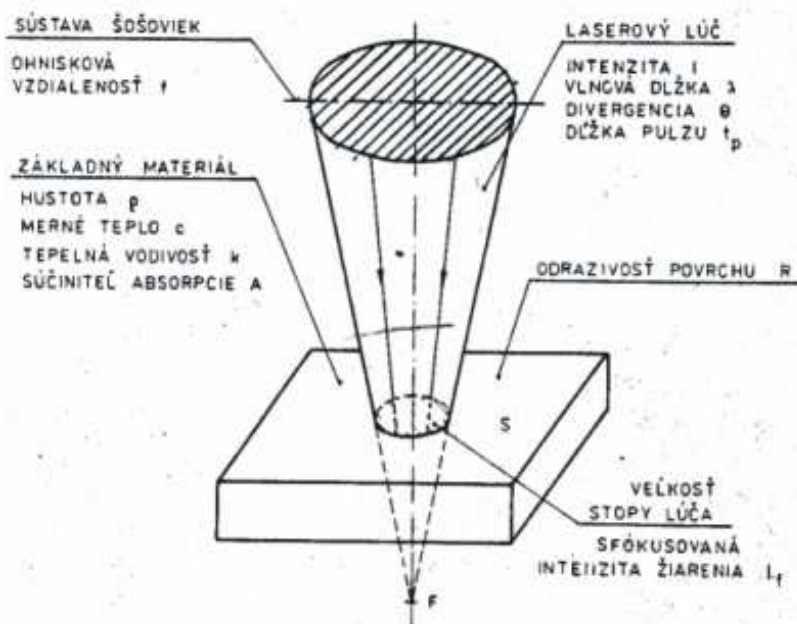
Zmínit bychom také měli předního světového výrobce laserových zařízení a to společnost Rofin, jejíž laserové výrobky jsou špičkou na světovém trhu. Tato společnost se zabývá vývojem zvláště laserů samotných a dále potom vývojem laserových zařízení pro popisování, mikrofrézování a mikroobrábění. Jedním z těchto „mikro“ laserů je model StarDisk (obr.2.26), který je využíván například pro zdrsňování solárních buňek. Vyznačuje se extrémně rychlým obráběním, kdy v obráběné solární destičce vytvoří několik desítek tisíc vrtů o průměru cca 30 μ m (obr.2.26) za dobu 5-10s. Pracuje v režimu Q-spínání a mód paprsku je TEM₀₀.



Obr. 2.26 Laser pro mikroobrábění StarDisk od společnosti Rofin (30)

2.2 Laserové technologie

V Předchozí kapitole vyslovená tvrzení o vlivu nejrůznějších materiálových charakteristik a parametrech laseru na proces interakce paprsku a obráběného materiálu ilustruje obr.2.27. Nesmíme zapomenout zmínit fakt, že významnou roli při předávání energie laseru povrchu hraje divergence paprsku a poloha ohniska paprsku vzhledem k opracovávanému povrchu. Většina laserových technologických operací je založená na tepelném účinku laseru na neprůhledný materiál (výjimkou může být např. obrábění skla). Připomeňme si, že energie laseru je přenesena do materiálu tepelným rozkmitem jeho mřížky. Tím se zvýší kinetická energie molekul a atomů a vzniká proces přeměny energie v teplo. Toto teplo roste s dobou trvání dopadu paprsku na materiál. Nasazení laserů do průmyslové výroby přineslo zcela nové dimenze a možnosti. Neustále rostou požadavky na zvyšování její kvality a efektivity.

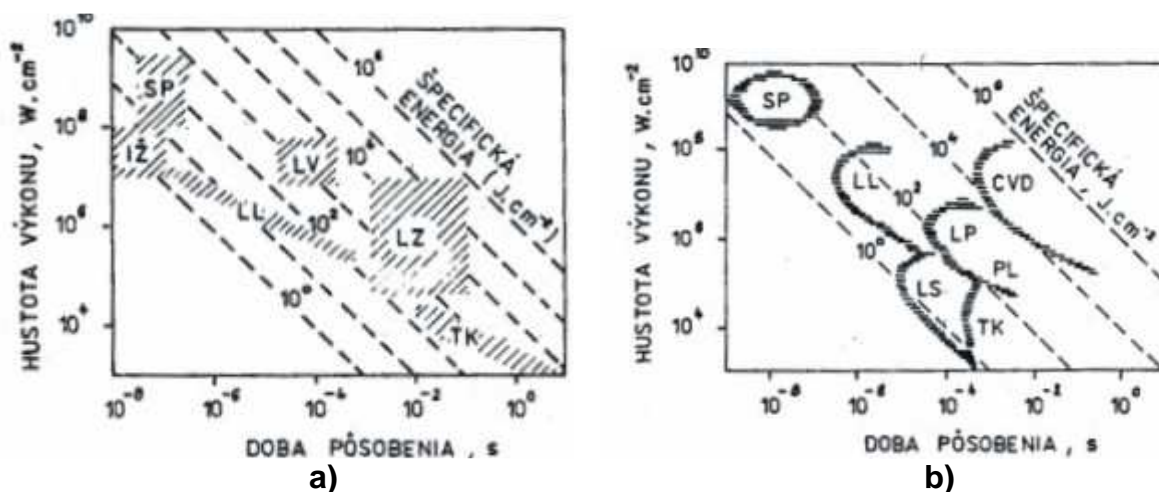


Obr.2.27 Výčet parametrů paprsku a materiálu ovlivňujících vzájemnou interakci (22)

Dle (22) je vhodné technologické operace rozdělit do tří základních skupin podle dosažené teploty materiálu (obr.2.28):

- Technologie s ohřevem materiálu pod teplotu solidu: laserové tepelné zpracování (žihání, kalení, popouštění, vytvrzování aj.), laserové chemicko-tepelné zpracování a některé druhy laserového obrábění.
- Technologie s ohřevem materiálu nad teplotu solidu a pod teplotu vypařování materiálu: natavení povrchu, povrchové legování, svařování, amorfizování, navážení, implantování fází, stříkání, zónová rafinace aj.
- Technologie s ohřevem materiálů na teplotu vyšší než solidus i na teplotu vyšší než je teplota vypařování materiálu: vrtání, dělení, povlakování a výroba

speciálních depozit, žlábkování, gravírování, deformační zpevnění materiálů laserovou šokovou vlnou, označování výrobků apod.



Obr.2.28 Schéma využití výkonového laseru v průmyslových aplikacích (22):

- a)** Laser v technologických procesech (IŽ - laserové žihání, LL - laserové leštění, LV - laserové obrábění, LZ - laserové svařování, TK - laserové kalení, SP - zpevňování kovů laserem - šokem),
- b)** Laser v technologických procesech (LP - laserové pokovování, PL - laserové povrchové legování, LS - laserové stříkání, CVD - chemická depozice prvků)

V poslední době nabývá na významu měření vzdáleností a měření rozměrů objektů jako např. délek, průměrů apod. nevýkonným laserem. Stejně tak je stále více využíván v holografii a nedestruktivní defektoskopii pro určování velikostí lokálních napětí a deformací při pracovní činnosti strojních součástí, ke sledování vibrací, distribuci a redistribuci hmotnosti namáhaných součástí.

Mezi základní oblasti, ve kterých se uplatňuje laser v průmyslu, patří (4):

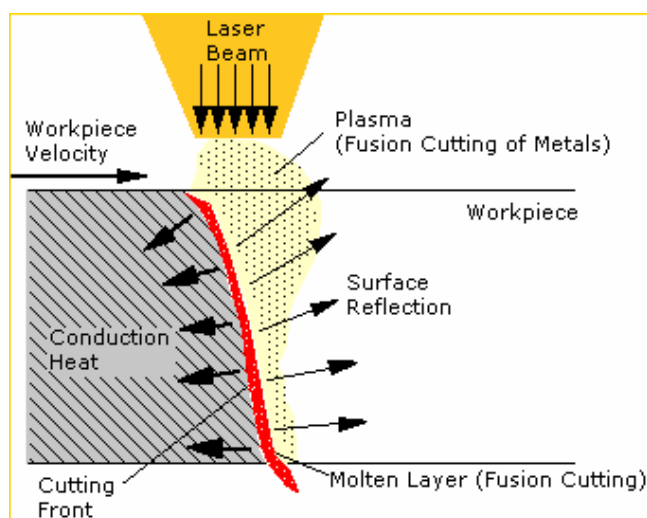
- *zpracování plechů - svařování, řezání, vrtání a ohýbání;*
- *obrábění - řezání drážek, obrábění dutin, vrtání, obrábění s předehřevem, popisování, dělení třísek, odhrotování, soustružení, frézování a mikrofrézování;*
- *tepelné zpracování - kalení, žihání, popouštění, zpevnění s natavením, amorfizace povrchu a rázové zpevnění;*
- *povrchové úpravy - nanášení různých druhů povlaků a sycení povrchu legujícími prvky, leštění povrchů, vytváření textur;*
- *technologie Rapid Prototyping;*
- *měření - délky, tvaru, polohy obrobku, počítání počtu vyrobených kusů, měření jakosti povrchu;*
- *renovace opotřebovaných součástí a nástrojů - navařování;*
- *vyvažování součástí - úběr materiálu součásti v předem daném místě;*
- *měření stavu napjatosti součástí - holografie;*
- *renovace opotřebovaných součástí a nástrojů - navařování;*
- *vyvažování součástí - úběr materiálu součásti v předem daném místě;*
- *měření stavu napjatosti součástí - holografie;*

- *dálkové řízení strojů;*
- *měření stavu opotřebení činné části nástroje;*
- *analýza chemického složení materiálů;*
- *vytváření textů na nedabovaných filmech;*
- *vytváření dekorací na a ve skleněných předmětech;*
- *renovace starých uměleckých děl - čištění;*
- *výzkum termojaderné fúze vyvolané laserem.*

2.2.1 Řezání laserem

Laserové řezání je použito v případech, kdy je třeba oddělit materiál s malou tepelnou vodivostí. Snahou tohoto procesu je v co nejkratším čase odpařit materiál tak, aby došlo jen k minimálnímu tepelnému zasažení (ovlivnění) okolní oblasti. Při řezání jsou nejčastěji použity lasery plynové CO₂ se středními výkony do 15kW. Lze jimi řezat konstrukční oceli až do tloušťky 20mm, oceli korozivzdorné do tl. 10mm a uhlíkové slitiny do tl. 5mm. *Pro přesnější řezy s menší šířkou řezné spáry se používají Nd:YAG lasery o výkonu 100 až 1000W, kterými lze řezat konstrukční oceli do tloušťky 6mm, korozivzdorné oceli do tloušťky 3mm a slitiny hliníku do tloušťky 2mm. Laserem lze řezat např. titan, oceli s nízkým obsahem uhlíku a korozivzdorné oceli (4).* V převážné většině průmyslových aplikací řezání laserem je souose s paprskem k místu řezu přiveden proud reaktivního plynu (kyslík apod.), čímž vznikne exotermická reakce a urychlí tak proces řezání (do tl. 40mm dle (30)). Při řezání nekovových materiálů jako jsou keramika, sklo, plasty, dřevo, textilie apod. je k místu řezu přiveden proud inertního plynu, který slouží pouze k odstranění odpařeného nebo odtaveného materiálu (do tl. 25mm dle (30)).

Během procesu řezu je energie paprsku pohlcena materiálem v zóně fokusace (hustoty výkonu 10^5 až 10^8 W/cm²), čímž dojde k tavení a odpařování (vznik plazmatu) materiálu (obr.2.29). Procesy řezání lze rozdělit na řezání odpařením, odtavením, reaktivním odtavením, kontrolovaným lomem, rýhováním, studené řezání a stabilizované pálení. Častou formou řezání laserem je mikrořezání (30). Podrobný rozbor této problematiky lze nastudovat v (10).



Obr. 2.29 Proces laserového řezání (31)



a)



b)

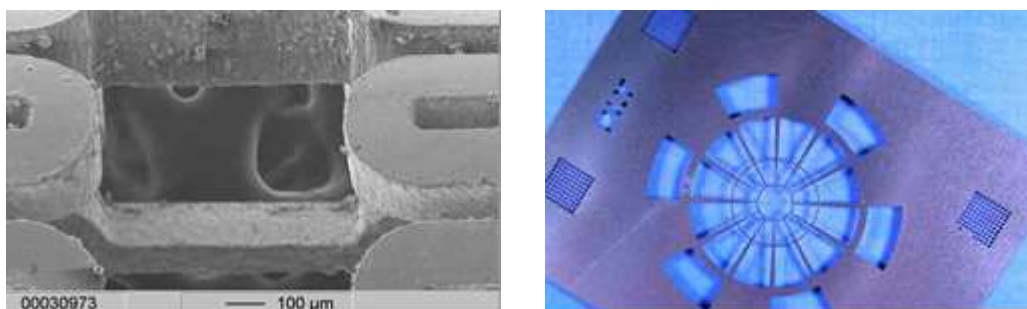
Obr.2.30 Laserové řezání (30), (31): a) Ukázka procesu fůzního řezání laserem, b) Výsledek řezu kevlarovým materiálem (zvětšeno elektronovým mikroskopem)

Charakteristika procesu:

- je jedním z nejrychlejších způsobů dělení materiálů;
- opracovávaný materiál nevyžaduje upnutí;
- opotřebení nástroje je díky bezkontaktnímu obrábění nulové;
- řez může být veden jakýmkoli směrem;
- hlučnost procesu je minimální;
- snadná automatizace procesu;
- některé obráběné materiály mohou být vrstveny na sebe – problém však vzniká v oblasti přechodů mezi nimi;
- téměř všechny materiály mohou být řezány laserem s výjimkou vysoce reflektivních materiálů, kterými jsou např. Al či Cu, kde je třeba užít správného laseru;
- řez je rovný a šířka řezu velmi malá, čímž je podstatně snížena spotřeba materiálu;
- obrobené hrany jsou ostré a nikoli okrouhlé, jak tomu bývá u jiných rezných tepelných technologií;
- řez je hladký a čistý a nevyžaduje dokončovací operace;
- řez je bez otřepů;
- hloubka řezu je omezená a závisí na výkonu laseru. Nejvyšších řezů je dosaženo při hloubkách 10-20mm.
- neprůchozí řezání lze provádět pouze u některých materiálech.



Obr.2.31 Příklady součástí obrobených řezáním (23)










Obr. 2.32 Mikrořezání laserem (30)

2.2.2 Svařování laserem

Soustředěný laserový paprsek je jedním z největších zdrojů hustoty energie, které jsou do dnes v průmyslu realizovatelné. Pokud je materiál schopen absorbovat tyto energie, potom dojde vždy k jeho vypařování. Při svařování je tudíž obvykle utvořena díra vypařováním materiálu. Tato díra projde materiálem, přičemž její povrch je tekutý a při pohybu laserového paprsku ve směru svařování se tento tekutý kov slévá dohromady a zanechává za sebou tzv. „keyhole“ (klíčová dírka) svar (obr. 2.33). „Keyhole“ svar je charakterizován shodností protějších tekutých zón a malou šířkou. Tab. 2.4 uvádí porovnání mezi základními způsoby svařování, kterými jsou: obloukové svařování pod tavidlem, obloukové svařování v ochr. atmosféře plynu, svařování plazmou, svařování laserovým nebo elektronovým paprskem.

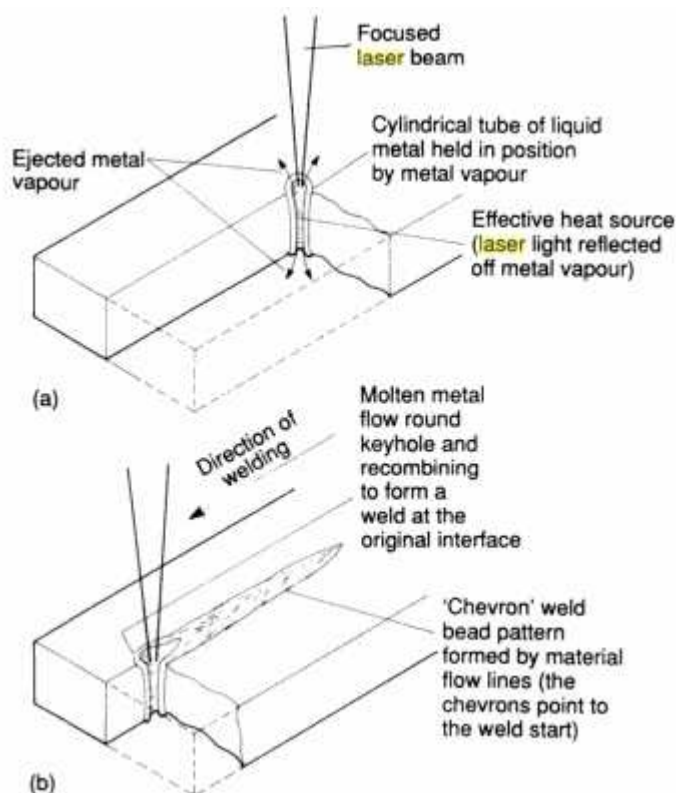
Tab. 2.4 Porovnání základních druhů svařování (10)

Table 4.1 Relative Power Densities of Different Welding Processes		
Process	Heat Source Intensity W^2/m	Fusion zone profile
Flux Shielded Arc Welding	$5 \times 10^6 - 10^8$	
Gas Shielded Arc Welding	$5 \times 10^6 - 10^8$	 low
		 high
Plasma	$5 \times 10^6 - 10^{10}$	 low
		 high
Laser or Electron Beam	$10^{10} - 10^{12}$	 defocus
		 focus

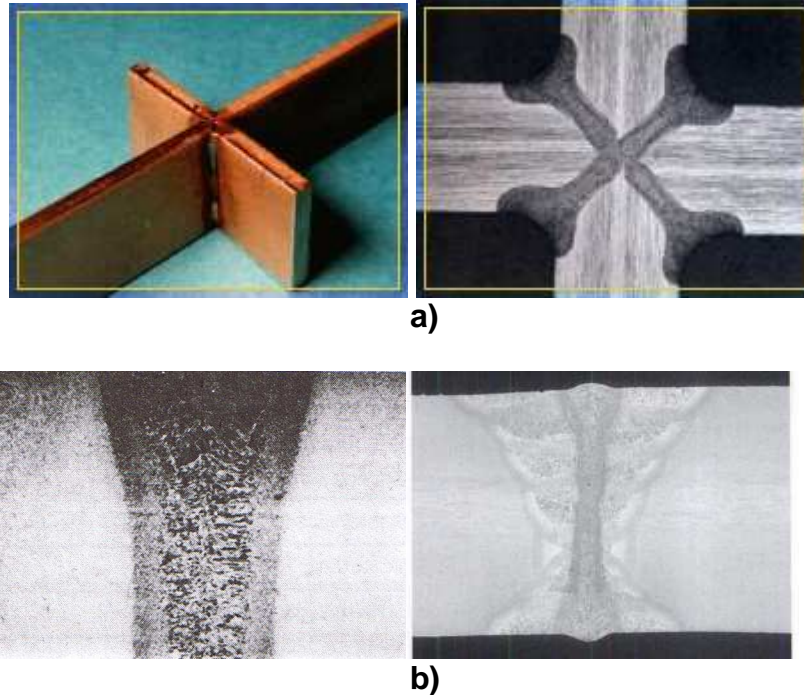
Laserového paprsku je využito k natavení materiálu do požadované hloubky při minimálním odpaření z povrchu. V průmyslové praxi se pro tuto aplikaci nejčastěji

používají lasery v oblasti spektra IR a to plynové CO₂ a lasery pevnolátkové Nd:YAG o daných vlnových délkách. V porovnání s jinými aplikacemi je pro svařování zapotřebí menší intenzity paprsku při delší době interakce s materiálem (řádově ms). Laserové svařování má velmi široké využití v mnoha průmyslových odvětvích. Spojují se jím např. hermetická pouzdra miniaturních relé, kardiostimulátory, kontakty v mikroelektronice, plechy, profily a součásti v leteckém a automobilovém průmyslu a v řadě dalších odvětvích. Jak jsme zmínili výše, tento způsob zpracování materiálů není tak energeticky náročný jako jiné technologie. 6kW laser CO₂, jehož fokusační délka je 200mm vyvolá na povrchu materiálu v místě dopadu hustotu výkonu cca 10⁶ W/cm². *Použitím paprsku dvěma odlišnými způsoby získáme dva základní procesy svařování (31):*

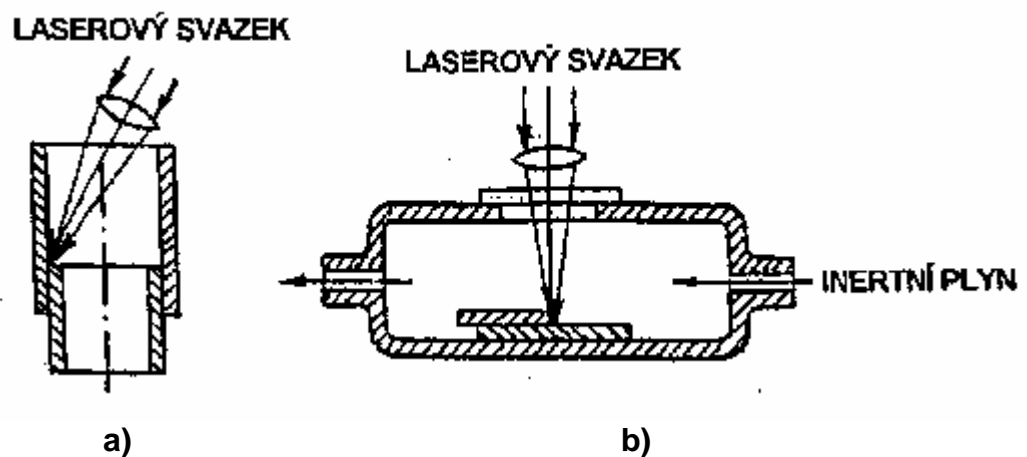
- *Pro nižší hustoty výkonu (<10⁶ W/cm²): energie je deponována na povrch svařované součásti a běžnými mechanismy tepelné vodivosti je dopravena do svaru. Tento proces se označuje jako svařování vedením;*
- *Pro vyšší hustoty výkonu (>10⁶ W/cm²): u tohoto procesu laserového svařování je rozhodující vliv ionizačního jevu, kdy povrch kovu je pokryt ionizovaným plynem, čímž v kombinaci s paprskem vytvoří „jehlové dutiny“ (keyholes) vyplněné ionizovaným plynem a parami, skrze které prostupuje energie hluboko do materiálu. Tento proces je označován jako penetrační svařování.*



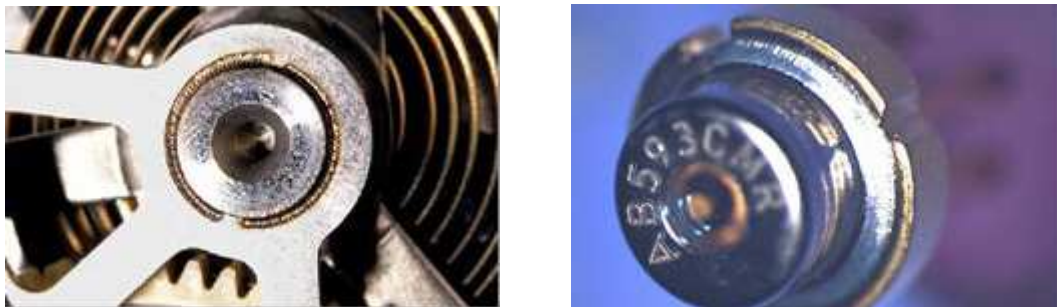
Obr. 2.33 Svařování laserem (14): a) Lze vidět zaostřený paprsek, válcovitý tubus tekutého kovu, který je držen ve své pozici unikajícími kovovými výpari („keyhole“), efektivní tepelnou zónu, **b)** Svar vzniklý pohybem paprsku ve směru svařování, kdy tekuté stěny „keyhole“ jsou slity dohromady



Obr. 2.34 Profil spojený laserovým svařováním (10),(14): a) Svařené dílce a Rentgenový pohled na jejich svar (centrolaser), b) Průchozí laserový svar- lze jasně vidět oblast roztaveného kovu a oblast tepelně ovlivněného kovu



Obr.2.35 Příklady laserového svařování (17): a) V těžce dostupných místech, b) V inertní atmosféře



Obr.2.36 Ukázka mikrosvařování (30)

Charakteristika procesu svařování:

- vysoká hustota energie, „keyhole“ typ svaru;
- malé tepelné ovlivnění okolního materiálu;
- vysoká pracovní rychlost;
- finanční efektivnost;
- na rozdíl od běžných způsobů svařování možnost velmi rychlého zastavení a spuštění procesu;
- svařování při atmosférickém tlaku;
- žádné generování rentgenových paprsků;
- úzký svar;
- možnost velmi přesného svařování;
- dobrý profil svarové housenky;
- žádná odchylka paprsku vlivem magnetického pole;
- relativně malé odpaření materiálu;
- možnost svařování těžce svařitelných materiálů;
- snadná automatizace;
- možnost hlubokých svarů;
- výborné mechanické vlastnosti svaru;
- nízká vstupní energie do systému;
- schopnost svařování různorodých materiálů různé geometrie;
- schopnost svařování součástek v ochranné atmosféře nebo zatavených uvnitř opticky transparentního materiálu.

Podrobnou problematiku laserového svařování lze nastudovat v (14).

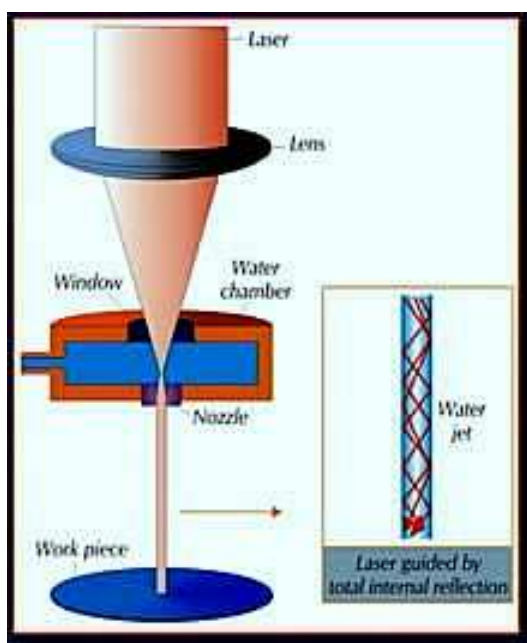
2.2.3 Vrtání laserem

Proces laserového vrtání je založen na odpařování obráběného materiálu. Oproti svařování je třeba větší energie paprsku, k čemuž se používají impulsní lasery při délce impulzu kratší než 1ms. Předností této technologie je možnost vrtání velmi malých otvorů o průměrech 10-100 μ m a to i na velice těžce dostupných místech, ve kterých jiné metody často selhávají. *Pro vrtání laserem platí, že čím je díra delší, tím více se odchyluje tvar díry od geometrie, což je způsobeno rozdělením energie paprsku. Díry mohou být kruhové i tvarové. Délka vrtané díry může být až*

50 mm. Vrtat lze kovy, plasty, textilie, dřevo, sklo, papír, keramiku a jiné přírodní materiály. Tato technologie se používá pro vrtání kamenů do hodinek, filtrů, vstříkovacích trysek, lopatek proudových motorů apod. (4). Pro vrtání v průmyslu se používají především:

- CO₂ lasery – vyřezávání jak kruhových, tak i tvarových otvorů, nejmenší průměr vyřezávaného otvoru je 5mm, nejmenší průměr vrtané díry je 0,2mm;
- Nd:YAG lasery - vrtání děr menších průměrů, nejmenší průměr vrtané díry je 0,025mm;
- excimerové lasery - vrtání děr do keramiky a mikrovtání.

Laserové vrtání spadá spíše do oblasti mikroobrábění vzhledem k rozměrům vrtaných děr (obr.2.37b). Na dnešním trhu lze nalézt i revoluční řešení týkající se vrtání přesných děr, kdy např. česká společnost D-Puls svařovací technika s.r.o. provádí technologie vrtání spojením excimerového laseru s vodním paprskem (obr.2.37a). Tyto dvě metody si v žádném případě nekonkurují, ale naopak jejich spojením dosahujeme velmi efektivních výsledků. *Proces si zachovává vlastnosti klasického pulsního laseru YAG jako je vysoká rychlost, přesnost a flexibilita a díky vodnímu paprsku omezuje tepelné namáhání materiálu. U obtížně obrobitelných materiálů jako například titan, zůstává chemická struktura kovu beze změn (33).* Tímto laserem lze dosáhnout minimálního průměru vrtané díry 20μm a poměru průměru díry ku hloubce až 1:20.

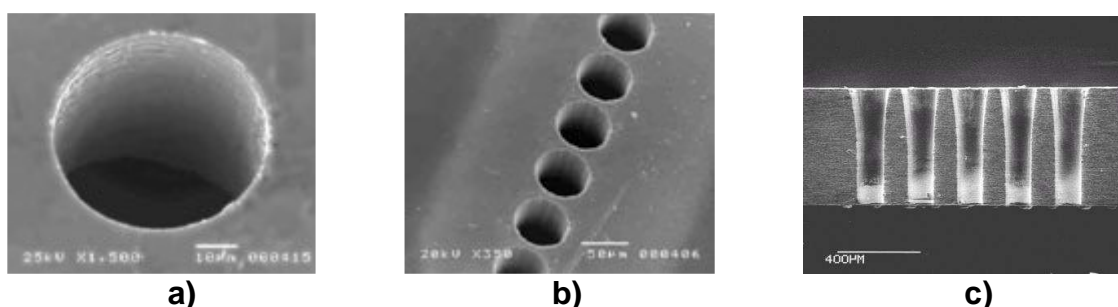


a)

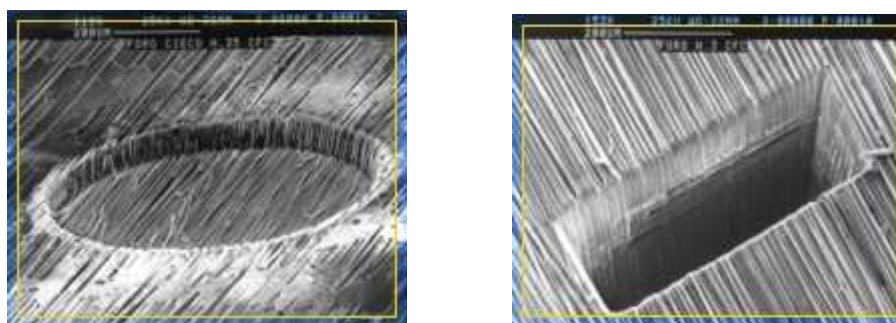


b)

Obr.2.37 Spojení laseru s vodním paprskem (33): a) Princip funkce, b) Vrtaný otvor (měřítko 200μm)



Obr. 2.38 Laserové mikrovrtání (32): a) měřítko 10 µm, b) měřítko 50µm, c) měřítko 400µm



Obr.2.39 Laserové mikrovrtání děr o různých hloubkách (31)

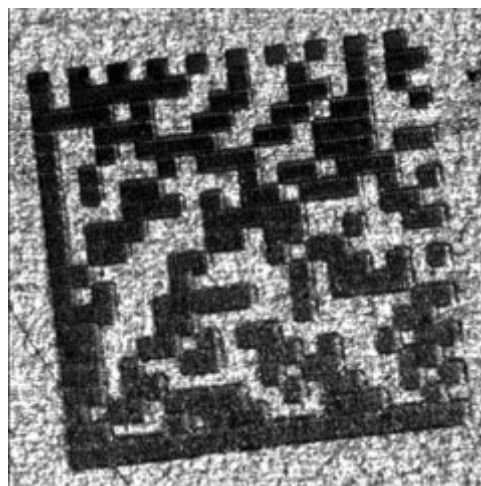
Charakteristika procesu vrtání:

- malé tepelné ovlivnění okolního materiálu;
- žádná odchylka paprsku vlivem magnetického pole;
- vrtání děr extrémně malých průměrů;
- téměř dokonale ostré hrany děr;
- vrtaný otvor nevyžaduje dokončovací operace;
- možnost hlubokých vrtů;
- velmi přesná technologie.

2.2.4 Laserové značení, značkování a rýhování

V podstatě jde o místní odpaření materiálu z povrchu obráběného předmětu. Paprsek laseru prochází přes masku, ve které jsou vyřezány vzory např. písmen, obrazců, kódů apod. a dopadem paprsku na povrchu vznikne obrazec dle předlohy. *Další možností je pohyb svazku laserového záření po povrchu značkováného materiálu nebo pohyb značkováného předmětu.. 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 (17). Znaky sloužící k identifikaci předmětů je možno nanášet na polovodičové,*

keramické a kovové povrchy, dále na plasty, feritové elementy, drahé kameny, dřevo, sklo, gumu, papír, kůži atd. Laserem lze popisovat téměř jakýkoli povrch od smaltovaného, povrchově tvrzeného, broušeného přes povlakované až po povrchy nejrůznějších geometrických tvarů. V podstatě je tato technologie odnoší mikrofrézování (gravírování). Nově se pro aplikace značení využívá laserů vláknových.



Obr.2.40 Vzory vytvořené technologií značení, kde vlevo lze vidět 2D čárový kód (32)

2.2.5 Laserové gravírování (mikrofrézování)

Podstata gravírování je stejná jako v případě značení a jde tedy o místní odpařování materiálu z obráběného povrchu. Tato aplikace slouží k vytváření jednoduchých i složitých reliéfů, které mohou být trojrozměrné nebo v rovině v několika vrstvách. Především se gravíruje do kalených ocelí (formy pro stříkání plastů a zápustky), keramických materiálů, dřeva, gumy, skla apod. Pro gravírování do kovových a keramických materiálů se používají obzvláště lasery Nd:YAG, pro gravírování do dřeva a gumy jsou naopak vhodné CO₂ lasery. Ve Výzkumném centru pro strojírenskou výrobní techniku a technologii byla vyvinuta metoda pro vytváření prostorových obrazců. Příklad plastického prostorového obrazce je na obr. 2.41. Kůň byl gravírován v oceli 19 436 do hloubky 0,5 mm. Model byl na počítači "rozřezán" na 50 vrstev, tloušťka jedné vrstvy odebírané paprskem laseru byla 0,01 mm. Při mikrofrézování hlubokých dutin je nutné řešit technologii vytváření kolmých stěn dutiny. Ve Výzkumném centru pro strojírenskou výrobní techniku a technologii byly vyvinuty dvě metody, které umožňují vytvoření nejen kolmých stěn, ale také rybniny (stěn se záporným sklonem) (obr.2.42) (4).



a)



b)

Obr. 2.41 3D Gravírování laserem(4): a) Dutina obrazce, b) Obtisk obrazce

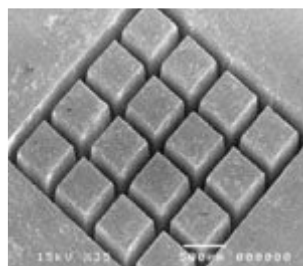


a)



b)

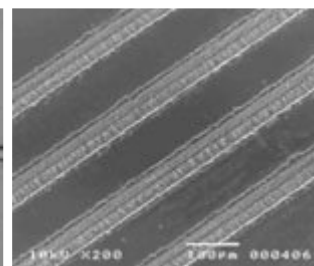
Obr.2.42 Dutiny obrobené laserem před a po korekci pravé stěny dutiny (ocel 14 220) (4)



a)



b)



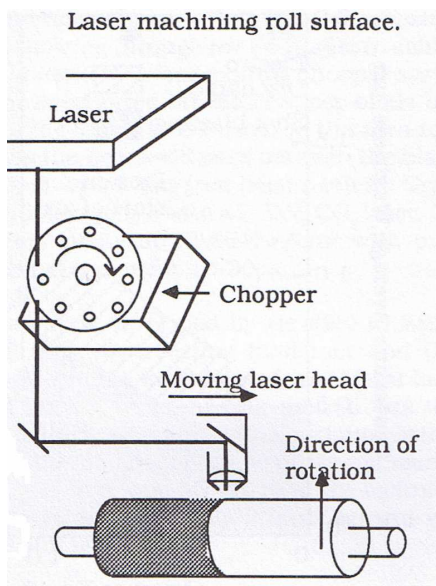
c)

Obr.2.43 Mikrogravírování (32): a) 2.5D mikrofrézování, b) mikrofluidní kanály, c) mikrokanály

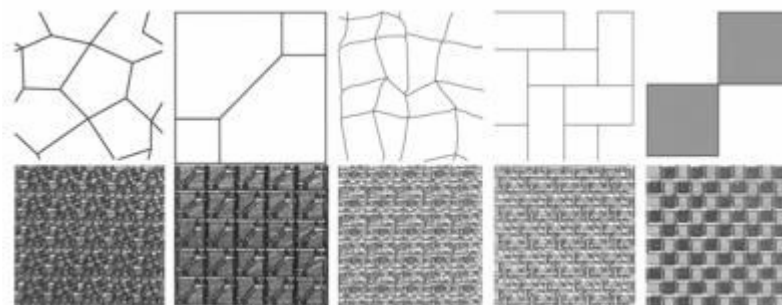
2.2.6 Laserové texturování

Tímto způsobem se texturují povrchy válců na zdrsňování povrchů ocelových plechů (obr.2.44). Používá se například u tiskařských válců, k dekoraci předmětů nebo u ohybadel s cílem zvýšení jejich životnosti. Tato aplikace je další odnoží

laserového gravírování stejně jako v případě značení. Obr. 2.45 ukazuje různé možnosti zdrsnění systematickým natavením povrchu.



Obr.2.44 Ukázka texturování válců, kde hlavní pracovní pohyb koná laserová hlava (10)

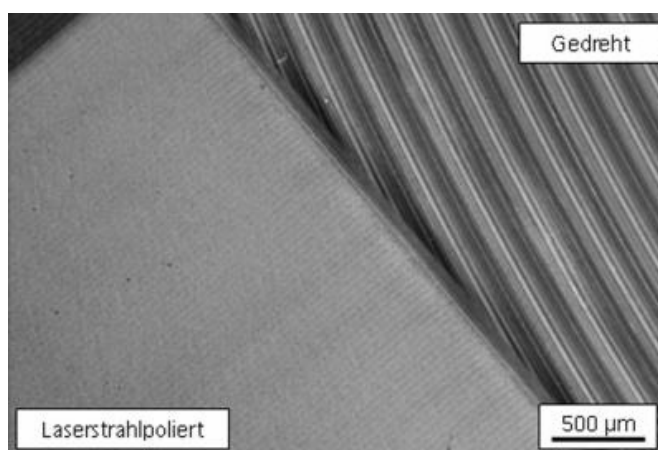


Obr.2.45 Vzory a jejich příslušné textury (4)

2.2.7 Laserové leštění povrchů

Laserové metody čištění povrchů se dnes již běžně používají např. pro odmašťování povrchu či jeho čištění od rzi nebo starých nátěrů. Nejčastěji využívanými při těchto postupech jsou lasery pulzní s mikrosekundovou, popřípadě nanosekundovou délkou trvání pulzu. Výkon laseru je volen tak, že jeho absorpcí v povrchové vrstvě a odpařením částic nežádoucí látky ještě nemůže dojít k tepelnému ovlivnění struktury základního materiálu, přičemž lze ovládat hloubku odpařované vrstvy nečistot. Leštění povrchu spočívá v natavení velmi

tenké ($<100\mu\text{m}$) porchové za účelem zarovnání drsností za působení povrchového pnutí. Nejčastěji leštěnými kovovými materiály jsou nástrojové oceli a to lasery Nd:YAG a Nd:YVO₄. K určitým procesním odlišnostem dochází za provozu těchto laserů buď v trvalém nebo pulzním režimu, kde při pulzním vedle přetavení vrstvy se částečně nejvyšší nerovnosti povrchu odpaří. Laserovým leštěním se dosahuje výrazného snížení drsnosti obráběných povrchů s Ra 1–3 μm na přibližně Ra 0,1 až 0,2 μm , bezdefektního povrchu a povrchu bez mikroskopických zbytků leštících prostředků, což bývá obvyklé při mechanickém leštění. Pokud je třeba dojít k ještě vyššímu snížení drsnosti, než jakého se dosáhne samotným laserovým leštěním, lze postup laserového leštění považovat za základní a v hybridním procesu ho kombinovat s dodatečným krátkým manuálním postupem a dosáhnout tak drsnosti povrchu Ra až 0,05 μm (6). Paprskem laseru se mohou také zpřesnit rozměry a tvar obrobku, kdy jde například o vytváření ostrých vnitřních rohů, které nelze vyrobřit frézováním a jinými postupy.



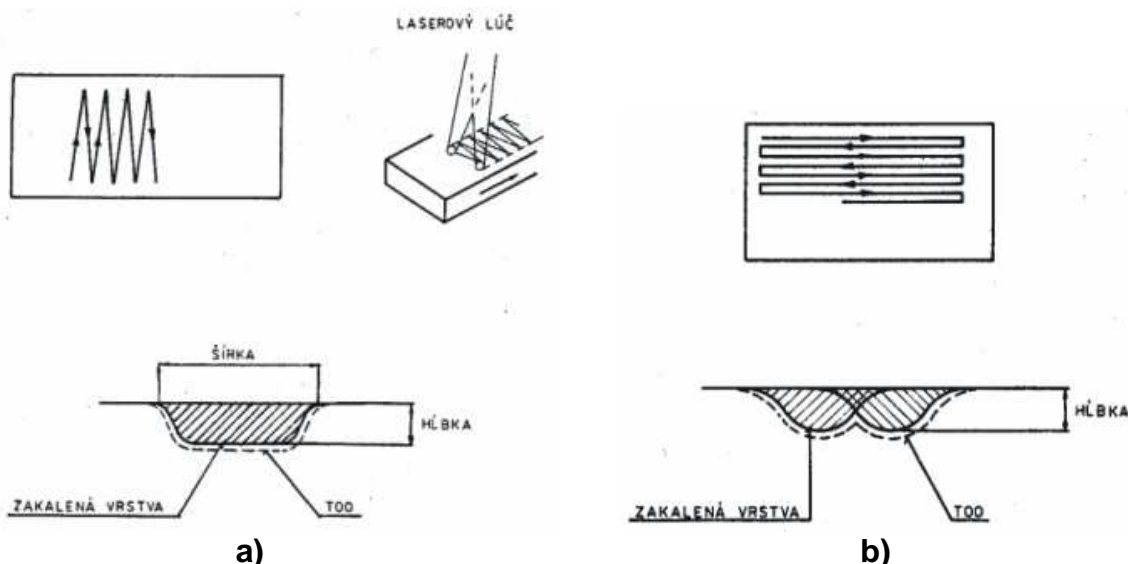
Obr.2.46 Porovnání soustruženého a laserem leštěného povrchu (6)



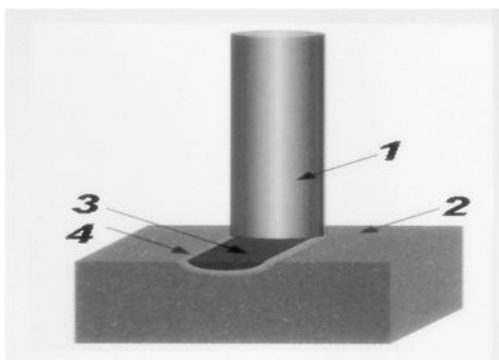
Obr. 2.47 Laserem částečně vyčištěný (vlevo dole) a zcela vyčištěný (vpravo) obraz (1)

2.2.8 Tepelné zpracování materiálů laserem

Laserové tepelné zpracování kovových materiálů využívá laser na ohřev materiálu pod teplotu solidu, tedy tepelné ovlivnění materiálu je řízené tak, aby nedošlo k jeho vypařování. *Využívá se zde množství specifických vlastností laseru a již dříve uvedených předností, především však mimořádné rychlosti startu a ukončení operace, možnosti definovaného tepelného ovlivnění povrchových vrstev materiálů posuzované z hlediska lokalizace, hloubky, plochy, objemu, nerovnosti povrchu, minimální deformace, mechanického působení na materiál, vlastností apod.* (22). Velikou výhodou tohoto způsobu je opět možnost zpracovat materiál v místech těžko přístupných prakticky bez jakýchkoli deformací. *Této 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* (17). Tento proces je extrémně rychlý, plně automatizovatelný. Tepelnými operacemi rozumíme především žíhání (rekrytalizační žíhání, žíhání povrchových vrstev, iontovo-implantovaných vrstev apod.), kalení a vytvrzování slitin. Při kalení se povrchová vrstva velice rychle zahřeje na kalicí teplotu a kritická rychlost poklesu teploty je zajištěna buď samotným materiálem nebo externím chlazením.



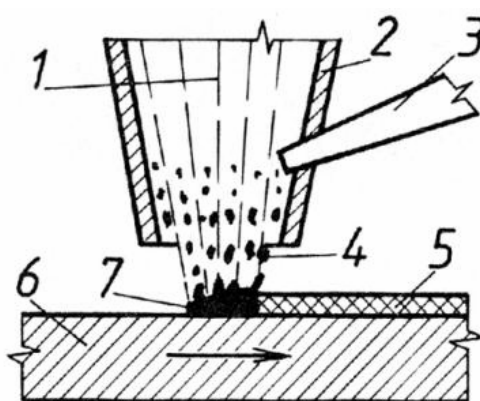
Obr.2.48 Schéma postupu při plošném tepelném ovlivňování povrchů laserem (22): a) oscilací, b) překrýváním se stop



Obr. 2.49 Princip kalení laserem (1): 1) paprsek laseru, 2) neovlivněný povrch, 3) zakalený materiál, 4) tepelně ovlivněná oblast

2.2.9 Laserové nanášení ochranných a otěruvzdorných povlaků

Materiál (keramika, kov apod.), který má být nanesen na povrch součásti je ve formě prášku nebo drátu přiveden do laserového paprsku, kde je roztaven a nanesen paprskem na povrch součásti, kde následně ztuhne, jak ilustruje obr. 2.50. Další možností povlaková ní je ten, že na materiál je předem nanesen vhodný materiál a ten reakcí s paprskem a materiálem součásti vytvoří pevnou vrstvu. Povlak může vzniknout též reakcí externě přivedeného plynu s paprskem laseru. Tloušťka vrstvy může být až 1mm. *Povlak vytvořený laserem má dobrou přilnavost k povrchu obrobku a nemá žádné trhliny. Lze jej nanášet na různé materiály, a to i na velmi tvarově složité součásti. Pro nanášení povlaků se používají CO₂ lasery o výkonu 5 kW, rychlost nanášení je 20 až 100 cm².min⁻¹ (3).*

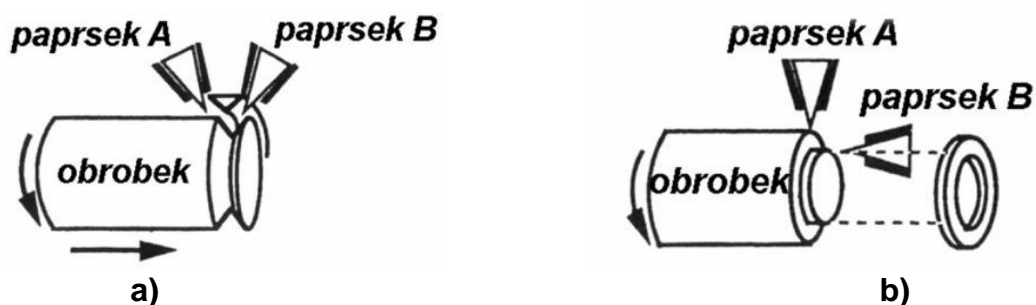


Obr. 2.50 Princip nanášení povlaků laserem (3): 1) paprsek laseru, 2) pracovní hlava, 3) přívod nanášeného materiálu, 4) roztavený nanášený materiál, 5) nanášený materiál, 6) obrobek, 7) tavenina

2.2.10 Laserové soustružení

Pro soustružení obrobků s využitím laseru se používají tři metody (3):

- *obrábění s předehřevem - vychází se z poznatku, že s rostoucí teplotou obráběného materiálu se mění jeho mechanické vlastnosti (snižuje se pevnost a tvrdost, a tím se zlepšuje obrobiteľnosť). Princíp metody spočíva v nasměrování paprsku laseru na obráběnou plochu obrobku bezprostředně před břit rezného nástroje;*
- *odtavování materiálu z povrchu obrobku: je založeno na intenzivním přívodu tepla na povrch obrobku, který se otáčí proti paprsku laseru. Působením tepla se materiál odtavuje a pomocí asistentního plynu je roztavený materiál odstraňován z místa obrábění;*
- *odřezávání materiálu dvěma různoběžnými paprsky laseru: dva nezávislé paprsky laseru jsou vzájemně skloněny pod určitým úhlem.*



Obr.2.51 Schéma soustružení laserem (3): a) šroubovicové, b) prstencové



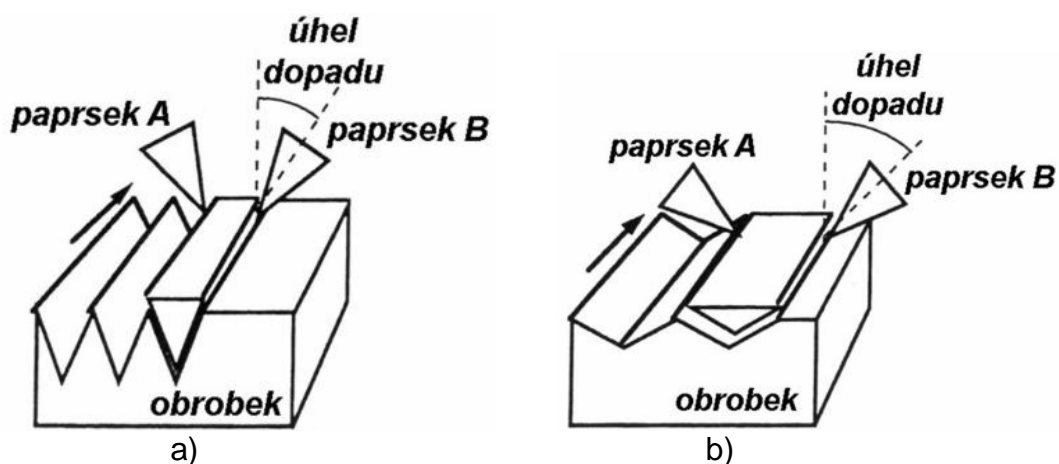
Obr. 2.52 Ukázka laserového soustružení prstencovým úběrem materiálu (3)

2.2.11 Laserové frézování

Při frézování se používají především lasery CO₂ a Nd:YAG se stejnými výstupními výkony jako při soustružení. Pracovní parametry jsou u frézování stejné jako u laserového řezání.

Při frézování se používají dva principy, popsané již u soustružení (3):

- odtavování nebo odpařování materiálu z povrchu obrobku;
- odřezávání materiálu dvěma různoběžnými paprsky laseru.



Obr.2.53 Frézování laserem (3): a) malý úhel dopadu paprsku laseru, b) velký úhel dopadu paprsku laseru

3. Porovnání s konvenčními metodami obrábění

Do konce minulého století se podařilo vyvinout výkonové lasery přesahující hranici 20kW, což umožnilo řezání a svařování ocelových plechů a plátů až do hloubky 10mm a více. To znamenalo velikou přednost v porovnání s konvenčními technologiemi svařování a řezání. Pravdou je, že pořizovací náklady laserových zařízení pro tyto výkonové technologické operace jsou vyšší, než u běžných metod. Jde ale především o počáteční, tedy pořizovací náklady, což je velice rychle vyváženo výhodou spočívající v tom, že při působení laserového paprsku na opracovávaný materiál vzniká mnohem méně tepla a zároveň působí na mnohem menší ploše zpracovávaného materiálu, než jak je tomu např. u klasického řezání nebo svařování. U takovýchto konvenčních metod dochází vlivem vysokých teplot způsobených řezacím nástrojem nebo svařovacím hořákem k šíření těchto vysokých teplot do okolí řezu či svaru a tím je způsobeno pnutí a deformace v obrobku. To znamená, že po aplikaci těchto technologií je třeba obrobený materiál dále upravit k získání požadovaných parametrů, což u laserového zpracování odpadá. V dnešní době jsou na trhu již běžné lasery o výkonech až 40kW a procesy laserového obrábění jdou stále mílovými kroky kupředu.

Základní odlišnosti laserových technologií v porovnání s konvenčními technologiemi - shrnutí:

- V místě oddělování částic materiálu nevzniká řezný odpor a obrobky se nedeformují vlivem mechanického namáhání;
- Úběr materiálu laserem nezávisí na parametrech materiálu typických pro konvenční způsoby obrábění (tvrdost, pevnost, houževnatost apod.);
- Možnost mikroobrábění;
- Minimální tepelné ovlivnění okolního materiálu díky „mikrorozměrovému“ úběru materiálu laserovým paprskem;
- Odpadají problémy spojené s mechanickým opotřebením nástrojů díky bezkontaktnímu procesu;
- Hlučnost procesu je minimální;
- Obrobené hrany jsou ostré a nikoli okrouhlé, jak tomu bývá u jiných řezných tepelných technologií;
- Obrobené plochy jsou hladké a čisté a nevyžadují dokončovacích operací;
- Řez laserem je rovný a šířka řezu velmi malá, čímž je podstatně snížena spotřeba materiálu;
- Při laserovém řezání je dosaženo nejmenšího úkosu ze všech tepelných metod dělení materiálů. Projevuje se závislost na tloušťce materiálu - na tenčím plechu je řez téměř kolmý, na tloušťkách kolem 10mm se úkos může pohybovat přibližně do 1 stupně;
- Snadná automatizace laserových procesů;
- Obrábění těžce přístupných míst, kde konvenční technologie selhávají;
- Vysoká rychlost a flexibilita procesů;

- Na rozdíl od běžných způsobů obrábění možnost velmi rychlého zastavení a spuštění procesu;
- Možnost svařování těžce svařitelných materiálů;
- Výborné mechanické vlastnosti obrobených ploch;
- Vysoké pořizovací náklady laserových systémů;
- Nutnost přizpůsobení organizačně-technickým problémům (občas bývá nutnost přestavět i celé technologické postupy);
- Významnou nevýhodou je velmi vysoká spotřeba elektrické energie dodávaná laserovým systémům;
- Vysoká spotřeba plynů aktivních médií.
- Lze dosahovat vynikajících drsností povrchu až 0,1Ra

Abychom laserové technologie pouze nevychvalovali, přibližme si nyní některé jejich základní nedostatky. Jak bylo uvedeno výše, náklady na pořízení laserových systémů a laserů samotných jsou značné stejně tak, jako jejich provoz. Při opracování materiálů je třeba dosažení vysoké kvality paprsku, s čímž je spojena notná energetická náročnost na provoz laseru a v případě plynových laserů vysoká spotřeba laserových plynů.

Problémem je také údržba a životnost laseru, která je sledována nejenom pracovníky firmy, která laser využívá, ale v mnoha případech je nepřetržitě monitorována (telepresenčně) i servisním týmem výrobce a to prakticky nepřetržitě.

Občas bývá nutností i přepracování technologického postupu. Jako příklad lze uvést svařování pozinkovaných ocelových plátů, kdy při působení paprsku se zinek taví a vypařuje dříve, než je natavena ocel. V takovém případě prochází výpary zinku svarem oceli a tvoří v něm díry. Tehdy je nutnost oprav a následkem jsou ztráty jak energetické, tak finanční a časové.

V automobilovém průmyslu je často zaváděno snižování hmotností karosérií náhradou klasické oceli lehčími kovy či slitinami. V takových případech je kladen požadavek svařování např. ocelových plátů s hliníkovými a tehdy vzniká problém. Při svařování ocelí s jinými kovy dochází k tvorbě tzv. křehkých (lámavých) intermetalických fází a jakýkoli laser tomuto není schopen zabránit.

Nevhodné aplikace jsou pak všechny takové, kde laser není technologicky schopen splnit požadavky (35):

- *Řezání příliš silných materiálů;*
- *Řezání s přesností v setinách mm a lepší;*
- *Řezání atypických materiálů;*
- *Řezání v opracovaných polotovarech s požadavkem na velice přesné umístění výřezů;*
- *Řezání s příliš velkou hustotou řezů či otvorů v jednotce plochy - hlavně u silnějších materiálů hrozí deformace a tavení.*

4. Bezpečnostní rizika laseru

Každý druh energie nese svá bezpečnostní rizika. Dokonce i potenciální energie může být pro člověka nebezpečná při nepozornosti a upadnutí z výše položených míst a laser není výjimkou. V dnešní době je úrazovost vlivem laserového záření téměř nulová díky nejrůznějším předpisům, upozorněním a ochranným pomůckám, ale i přesto úrazy byly a stále mohou být. Základní nebezpečí, která hrozí při manipulaci s laserem a laserovými zařízeními jsou:

- Poškození očí;
- Poškození kůže;
- Nebezpečí úrazu elektřinou;
- Nebezpečí výparů.

4.1 Obecné standardy

Výše uvedená rizika mohou být minimalizována následujícími standardy, které mohou být uloženy různými orgány. Většina zemí měla svá vlastní pravidla bezpečnosti práce s laserovými zařízeními, ale od počátku tohoto století přešla „laserová obec“ na jednotná pravidla. Jsou dva druhy bezpečnostních předpisů: požadavek výrobce a požadavek uživatele. *Předpisy mohou být právně závazné, nebo dobrovolné standardy, které mohou být použity v soudním řízení při hodnocení závazků v případě nehody (10).* Nejaktuálnější normy týkající se laserové manipulace jsou stanoveny organizacemi a instituty:

- Evropská Instituce pro Elektrotechnickou Standardizaci – European Organisation for Electrotechnical Standardisation (CENELEC);
- Americký Národní Institut pro Standardizaci – American National Standards Institute (ANSI);
- Evropská Organizace pro Standardizaci – European Organisation for Standardisation (CEN);
- Mezinárodní Organizace pro standardizaci - International Standards Organisation (ISO).

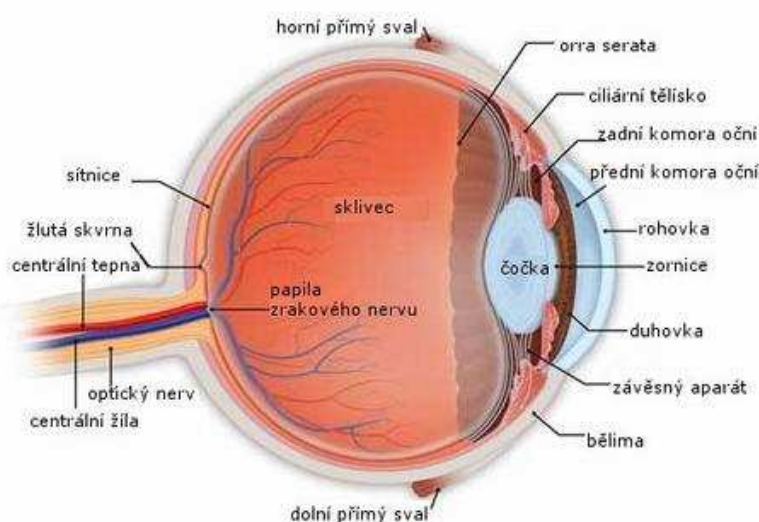
Veškeré tyto normy udávají směrnice a pravidla týkající se: technických kontrol, vyznění o osobním ochranném vybavení, administrativních a procedurálních kontrolách a speciálních kontrolách. Třída 4 pro laserové instalace, kterou většinou splňují všechny systémy pro obrábění materiálů má svého LSO (Laser Safety Officer – inspektor pro laserovou bezpečnost), který pravidelně kontroluje dodržování těchto ustanovení.

4.2 Škodlivost laserového paprsku

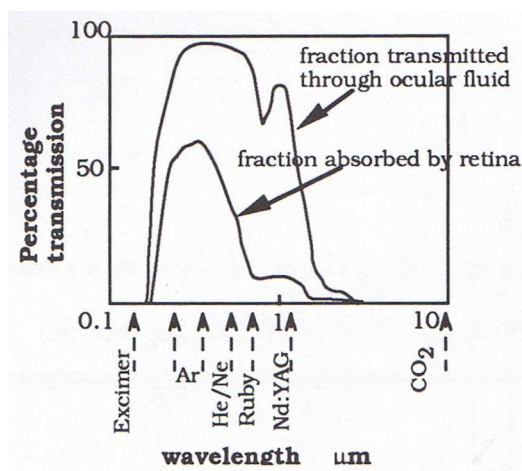
4.2.1 Poškození očí

Oční fluidum (sklivec) má svojí vlastní spektrální propustnost, jak je uvedeno na obr. 4.1. Ten ukazuje, že existují dva problémy vztahující se k dopadu světelného

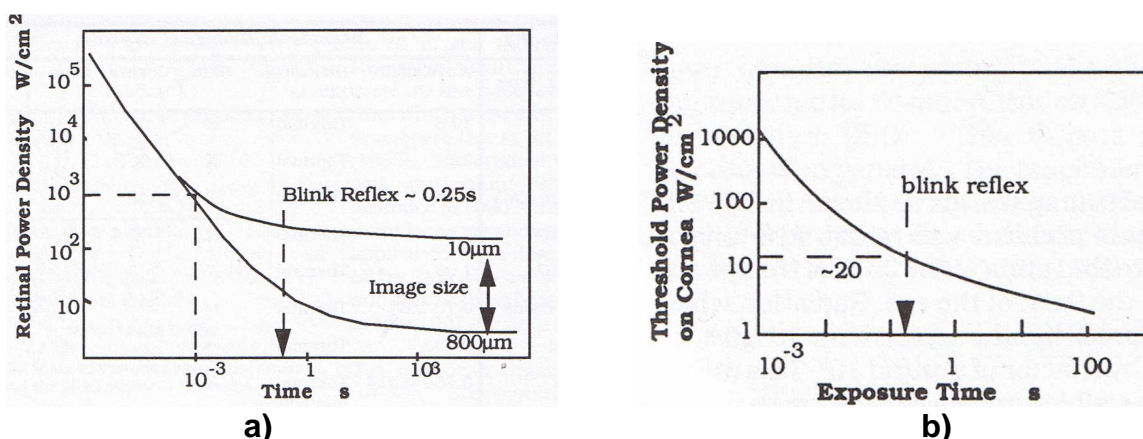
paprsku do oka, kterými jsou: poškození sítnice (latinsky retina) v zadní části oka a poškození rohovky (latinsky cornea) v přední části oka (obr.4.1). Záření dopadající na sítnici je zaostřováno oční čočkou, čímž se zesílí množství dopadající energie na sítnici na násobek až 10^5 přichozícího záření. Takovéto soustředění energie do extrémně malého bodu na sítnici vede k bodovému přehřátí oka a k jeho trvalému poškození. Například He/Ne laser o výkonu 1mW a průměru paprsku 3mm bude mít hustotu dopadající energie $(0,001 \times 4) / (3,14 \times 0,3 \times 0,3) = 0,014 \text{ W/cm}^2$. Při fokusaci oční čočkou pak tato energie vzroste na hodnotu $0,014 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$. Znamená to, že lasery generující záření ve viditelném nebo k viditelnému se blížícím spektru (Ar, He/Ne, Nd:YAG, Nd:Sklo apod.) jsou mnohem více nebezpečné, než lasery se zářením ve spektru neviditelném (CO₂, Excimerové) (obr.4.2). Hodnoty nebezpečného vystavení oka dopadu záření (Maximum Permissible Exposure levels - MPE) byly stanoveny experimentálně a jsou ilustrovány na obr. 4.3.



Obr.4.1 Anatomie oka (26)



Obr.4.2 Procento propustnosti oční kapaliny v závislosti na vlnové délce (viditelnosti) laserového záření (10)



Obr.4.3 Průměrné hodnoty hustoty energie, které způsobí poškození oka v závislosti na čase vystavení oka záření (10)

4.2.2 Poškození Kůže

MPE hodnoty exponování kůže laserovému záření jsou také stanoveny, ale jsou mnohem méně nebezpečné v porovnání s poškozením očí a jsou tudíž relativně nepodstatné. Ovšem laser je samozřejmě schopen prostoupit lidským tělem stejně snadným způsobem, jako je tomu u kovových materiálů, a proto bychom měli zaostřený laserový paprsek brát velice vážně. Možné poškození kůže laserovým paprskem je popálení nebo pořezání. Rány jsou ale čisté, vypálené a snadno se zhojí narozdíl od očí.

4.2.3 Nebezpečí úrazu elektřinou

Převážná většina tragických nehod při manipulaci s lasery je spojená s přívodem elektrické energie. Např. CO_2 lasery mají typický přívod el. energie 30000V při hodnotách proudu 400mA a vyšších. Obvody laserových zařízení obsahují rozlehlé kondenzátory a i při odstavení elektrické energie je možnost úrazu. Proto tato zařízení musí být opatřena uzemněními a bezpečnostními tlačítky.

4.2.4 Nebezpečí výparů

Velmi vysoké teploty spojené s laserovým obráběním dávají za vznik odpařování obráběných materiálů. Tyto výpary jsou v řadě případů jedovaté. Při obrábění je pravděpodobnost vzniku nejrůznějších chemikálií v závislosti na interakci paprsku, obráběného materiálu a doprovodných materiálů či plynů. Některé tyto chemikálie jsou velice nebezpečné jako např. kyanidy či nejrůznější formy karcinogenů. K zabránění úrazů parami je základním předpokladem dobře ventilované pracoviště.



Obr.4.5 Ochrana očí brýlemi s propustností 59% (18).

4.3 Bezpečnostní třídy laseru

Lasery jsou rozděleny do následujících bezpečnostních tříd:

- **Třída I:** možný trvalý pohled do svazku laserových paprsků, ($<0,2\mu\text{J}$ za 1ns pulzu nebo $<0,7\text{mJ}$ za 1s pulzu);
- **Třída II:** kontinuální a viditelné záření ($<1\text{mW}$ laser), přímý pohled do zdroje možný, oko ochrání mrkací reflex;
- **Třída III:** **a)** totéž jako třída II, ale oko již může být poškozeno za pohledu do zdroje pomocí optické soustavy (např. dalekohled), ($<5\text{mW}$ laser s hustotou výkonu $25\text{W}/\text{cm}^2$);
b) nebezpečí poškození oka, nutno používat ochranné pomůcky (i při pozorování odrazu), max. emise $0,5\text{ W}$, ($<0,5\text{W}$ CW laser viditelného spektra, $<2,4\text{mJ}$ za 1ns pulz);
- **Třída IV:** totéž jako třída III b), emise překračuje výkon $0,5\text{ W}$, může způsobit požár, poškození očí při přímém kontaktu s paprskem.



Obr.4.6 Bezpečnostní označení laseru třídy II a vyšší (9)

ZÁVĚR

Při pohledu na obsah této práce, která se zabývá pouhým rešeršním shrnutím zadané problematiky je zcela zřejmé, že světelný paprsek hraje nezastupitelnou roli v mnoha strojírenských aplikacích a jeho budoucnost v této sféře je nesporná. Lze očekávat jeho neustálé zdokonalování a s tím i rozšiřující se možnosti jeho dosud nepoznaného technologického využití i při nejnáročnějších operacích.

V porovnání s konvenčními metodami obrábění je laser velice nákladný a tudíž je stále řazen mezi tabu pro většinu rádobu uživatelů. Konvenční pořizovací náklady se pohybují okolo hranice sta eur za jeden jediný watt jeho výkonu, což ve výsledku, uvědomíme-li si kolikawattové lasery jsou zapotřebí pro běžné procesy laserového obrábění, dává ohromné cifry pro mnohé nesplnitelné. Tato jistě největší nevýhoda laserů dává klasickým metodám obrábění šanci k dalšímu přežití. Ovšem jak známo, stále jsou tendence výrobců zdokonalovat tato zařízení a vycházet uživatelům maximálně vstříc. V budoucnu tedy můžeme očekávat mnohem nižší pořizovací náklady laserů a laserových systémů, což by mohlo ohrozit některé již zmíněné klasické metody.

Při stručném shrnutí poznatků získaných během analyzování této nekonvenční metody obrábění lze konstatovat fakt, že jsme se seznámili se základními fyzikálními principy působení světelného paprsku na zpracovávaný materiál, základními technologickými operacemi, jež jsou ve strojírenství aplikovány a dále jsme byli obeznámeni s problematikou průmyslových laserů samotných.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŘASA, Jaroslav, JINDROVÁ, Radka. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006, č. 6 [cit. 2009-05-25], s. 34. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>>.
- [2] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonenční metody obrábění-4.díl: Obrábění paprskem fotonů-laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č. 3 [cit. 2009-05-25], s. 80. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-4-dil>>.
- [3] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana. Nekonenční metody obrábění-5.díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č. 5 [cit. 2009-05-25], s. 68. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-5-dil>>.
- [4] ŠMÍD, Jiří. Laser a roboty. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, č. 10 [cit. 2009-05-5], s. 18. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/laser-a-roboty>>.
- [5] ŠMÍD, Jiří. Slab, Innoslab, kotoučový nebo vláknový laser?. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, č. 3 [cit. 2009-05-5], s. 72. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser>>.
- [6] ŠMÍD, Jiří. Leštění povrchu laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009, č. 4 [cit. 2009-05-8], s. 54. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lesteni-povrchu-laserem>>.
- [7] ŠMÍD, Jiří. Lasery pro průmysl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č. 7 [cit. 2009-05-8], s. 32. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl>>.
- [8] 3D a 2D laserové stroje. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001, č.5 [cit. 2009-05-25], s. 50. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/vydani/2001/5/1>>.
- [9] *Wikipedie : Otevřená encyklopedie* [online]. 1999 [cit. 2009-05-10]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/>>.
- [10] STEEN, William. Laser material processing. Springer. 2nd edition. Londýn : Springer, 1998. 346 s. ISBN 3-540-76174-8.
- [11] REICHL, Jaroslav , VŠETIČKA, Martin . *Encyklopedie fyziky* [online]. c2006 [cit. 2009-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=778>>.

- [12] LUKIN, Konstantin. Interference of Sinusoidal Waveforms [online]. 1998 , 27.5.2007 [cit. 2009-05-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.eserc.stonybrook.edu/ProjectJava/WaveInt/index.html>>.
- [13] ALLMEN, Martin von. Laser-beam interactions with materials : Physical principles and applications. 2nd edition. [s.l.]: Springer, 1987. 232 s. ISBN 3540594019, 97835.
- [14] DAWES, Christopher. Laser welding : a practical guide. Woodhead Publishing. [s.l.] : [s.n.], 1992. 258 s. Dostupný z WWW: <http://books.google.cz/books?id=coWfkULEVPQC&dq=laser+welding&source=gbs_summary_s&cad=0>. ISBN 1855730340, 97818.
- [15] MIGLIORE, Leonard R. . Laser materials processing. [s.l.] : CRC Press, 1996. 319 s. Dostupný z WWW: <http://books.google.cz/books?id=_rVTz2qVgz0C&dq=migliore+laser&source=gbs_summary_s&cad=0>. ISBN 0824797140, 97808.
- [16] STEEN, William. Laser material processing. Springer. 3rd edition. [s.l.] : Springer, 2003. 408 s. Dostupný z WWW: <http://books.google.cz/books?id=8E_Ruj0hvzWC&dq=laser+material+processing&printsec=frontcover&source=bl&ots=Y7jUCqQ7Md&sig=ds7759l-AD2fVqTAANY_vRXbAVc&hl=cs&ei=4J_sSdHEHMGO_QbBrdHRAw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=7>. ISBN 1852336986, 97818.
- [17] ŠLĚOR, Milan. *Projekt VEGA : Současná fyzika pro budoucí experty* [online]. Verze 0.5. Praha : 2000 [cit. 2009-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/lasery/node1.html>>.
- [18] Medicom a.s.. *MediCom* [online]. [1999] [cit. 2009-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://medicom.cz/p.php?p=prumyslove,produkty,popislaser>>.
- [19] Laser - od objevu k průmyslovým aplikacím . *Elektro* [online]. 2005, č. 04 [cit. 2009-05-26].
- [20] *MITSUBISHI EDM/LASER* [online]. c2005 [cit. 2009-05-25]. Dostupný z WWW: <http://www.mitsubishi-world.com/index.php?option=com_content&task=view&id=143&Itemid=1129>.
- [21] *PRIMA NORTH AMERICA* [online]. c2009 [cit. 2009-05-25]. Dostupný z WWW: <http://www.prima-na.com/pages/17_optimo.cfm>.
- [22] *Použití laseru při spojování autokarosérií* [online]. c2003 [cit. 2009-05-25]. Dostupný z WWW: <<http://dp.bajaja.net/05.html>>.
- [23] The Laser Cutting Co. [online]. c2005 [cit. 2009-04-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.lasercuttingco.com/services.htm>>.

- [24] SÝKOROVÁ, Libuše. Výzkum obrábění nekovových materiálů laserem. Brno, 2000. 139 s. Dizertační práce.
- [25] VRBOVÁ, Miroslava. Lasery a moderní optika. Praha : Prometheus, 1994. 474 s. ISBN 80-85849-56-9.
- [26] Www.zeleny-zakal.cz [online]. c2009 [cit. 2009-04-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.zeleny-zakal.cz/jak-vidime>>. ISSN ISSN 1803-018.
- [27] Od plynového k vláknovému a kotoučovému laseru. TECHNIK.IHNED.CZ [online]. 2009 [cit. 2009-05-08]. Dostupný z WWW: <[http://technik.ihned.cz/index.php?p=800000_d&&article\[id\]=34147790](http://technik.ihned.cz/index.php?p=800000_d&&article[id]=34147790)>. ISSN 1213-7693.
- [28] Laser 2007. Technický Týdeník [online]. 2007 [cit. 2009-04-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=2864&mark=>>>.
- [29] KELKAR, Girish. Laser Basics: Interactions with Materials [online]. 2007 [cit. 2009-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.devicelink.com/mddi/archive/07/03/009.html>>.
- [30] Rofin - Lasers for Industry [online]. [2008] [cit. 2009-05-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.rofin.com/index-e.htm>>.
- [31] Centro Laser [online]. [2000] , 10.2.2003 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.centrolaser.it/en/lavorazioni.html>>.
- [32] Oxford lasers [online]. c2008 [cit. 2009-05-02]. Dostupný z WWW: <http://www.oxfordlasers.com/en/micromachining/applications_laboratory.htm>.
- [33] D-Puls svařovací technika s.r.o. [online]. c2008 [cit. 2009-05-18]. Dostupný z WWW: <http://www.dpuls.cz/cs/laseroveznaceni_systemy_vrtanipresnychder/>.
- [34] Linde Gas a.s. [online]. c2008 [cit. 2009-04-05]. Dostupný z WWW: <http://www.linde-gas.cz/international/web/lg/cz/like35lgcz.nsf/docbyalias/ind_mv_laser8>.
- [35] CHPS s.r.o. [online]. [2003] [cit. 2009-04-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.chps.cz/rezani-laserem/priklady-aplikaci.html>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
E	[V/m]	Intenzita elektrického vektorového pole
E_0	[V/m]	Intenzita elektrického vektorového pole po průchodu materiálem
N_i	[jonty/m ³]	Ionizační hustota
E_0	[atomy/m ³]	Atomová hustota
V_i	[eV]	Ionizační potenciál
R	[%]	Odrazivost materiálu
A	[%]	Pohltivost materiálu
n_1	[/]	Index lomu materiálu pro vakuum
λ	[m]	Vlnová délka záření
ω	[rad/s]	Úhlová rychlost vlny
α	[m ⁻¹]	Součinitel absorpce
I	[W]	Intenzita záření
I_0	[W]	Intenzita záření po průchodu materiálem
w	[m]	Rádus paprsku
z	[m]	Směr (vzdálenost) šíření vlny
P	[W]	Výkon paprsku
c	[m/s]	Rychlost šíření světla ve vakuu
Φ	[°]	Úhel dopadu paprsku
φ	[°]	Úhel lomu paprsku
k	[/]	Koeficient zániku
W_B	[W/m ²]	Hustota energie paprsku
M^2	[/]	Kvalita paprsku
L	[m]	Difúzní délka
Φ	[°]	Úhel dopadu paprsku
v_1	[m/s]	zdánlivá rychlost šíření v médiu 1
v_2	[m/s]	zdánlivá rychlost šíření v médiu 2
D	[m]	Průměr paprsku
D_s	[m]	Průměr bodu dopadu zaostřeného paprsku
a	[W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	Teplotní vodivost
t	[s]	Délka trvání pulzu
f	[Hz]	Frekvence