

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta

Katedra fyziky

Lasery

Bakalářská práce

Vedoucí práce: PaedDr. Jiří Tesař, Dr.

Autor: Ivan Mrákava

České Budějovice

Prosinec 2006

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a že jsem všechny použité prameny uvedl v Seznamu použitých zdrojů.

Anotace

Cílem této bakalářské práce je popsat lasery a některé jejich modifikace. Práce se zabývá vývojem tohoto zařízení a jeho nejdůležitějších částí, popisuje základní technologické principy. Na přiloženém CD je tato práce zpracována jako webová prezentace, která bude sloužit jako multimediální studijní materiál.

Annotation

The purpose of this bachelor work is to describe the lasers and some of their modifications. The work describes development of this device, its most important parts and basic technology principles. On the attached CD is this work cultivated like a web- presentation, which will serve like a multimedia educational material.

Obsah:

1. Úvod	- 6 -
2. Optické kvantové generátory	- 7 -
2.1. Objev laseru	- 8 -
2.2. Světelné zdroje	- 8 -
2.3. Oscilační obvod	- 9 -
2.4. Fabryho-Perotův interferomet	- 10 -
2.5. Aktivní prostředí	- 11 -
3. Základní vlastnosti laserového prostředí	- 12 -
3.1. Absorpce energie kvantovými systémy	- 12 -
3.2. Spontánní emise záření	- 13 -
3.3. Stimulovaná emise záření	- 14 -
4. MASER (mikrovlnný kvantový generátor)	- 16 -
4.1. Separční maser	- 17 -
5. Lasery	- 18 -
5.1. Pevnolátkové lasery	- 18 -
5.1.1. Rubínový laser	- 22 -
5.1.2. Laser s neodymovým sklem	- 25 -
5.1.3. Nd: YAG laser	- 26 -
5.1.4. Polovodičové lasery	- 27 -
5.2. Plynové lasery	- 31 -
5.2.1. Helium-neonový laser	- 34 -
5.2.2. Iontové lasery	- 37 -
5.2.3. Argonový iontový laser	- 38 -
5.2.4. CO ₂ – laser	- 39 -
5.2.5. TEA CO ₂ – laser	- 42 -
5.2.6. Dusíkový laser	- 43 -
5.3. Ostatní typy laserů	- 45 -
5.3.1. Barvivové lasery	- 45 -
5.3.2. Chemické lasery	- 47 -
5.3.3. Lasery s volnými elektrony	- 50 -
5.3.4. FIR lasery (lasery vzdálené infračervené oblasti).....	- 50 -
5.3.5. UV a VUV lasery	- 51 -
6. Využití laseru	- 52 -
6.1. Technologické využití laseru	- 52 -
6.1.1. Laserové sváření	- 52 -
6.1.2. Laserové vrtání	- 53 -
6.1.3. Laserové řezání	- 53 -
6.1.4. Laserové značkování	- 54 -
6.2. Laserová tiskárna	- 55 -
6.3. Medicínské použití laserů	- 56 -
7. Rizika spojená s laserovým zářením	- 59 -
8. Vliv záření na biologické tkáně	- 60 -
9. Bezpečnostní předpisy	- 61 -
10. Multimediální studijní materiál	- 62 -
11. Závěr	- 64 -
12. Seznam použitých zdrojů	- 65 -

1. Úvod

Lasery patří k nejvýznamnějším průmyslovým objevům druhé poloviny 20. století. Souhrnně se označují jako kvantové generátory světla a zesilovače záření, které nejčastěji pracují v optické oblasti elektromagnetického spektra. Lze se s nimi setkat v mnoha oborech lidské činnosti. Patří mezi umělé zdroje záření, podobně jako žárovky, výbojky, infrazářiče atd. Jejich záření má však specifické vlastnosti, které nejsou dosažitelné u jiných zdrojů. Dynamika rozvoje optiky a kvantové elektroniky řadí problematiku laserů mezi přední trendy fyzikálního výzkumu.

V praxi se lasery uplatňují zejména v lékařství, v měřicích a diagnostických metodách, v moderních technologiích a přenosu informací.

Rád bych se v této práci zaměřil na vývoj laserů, základní principy, díky kterým pracují. Hlavním cílem této práce je jasným způsobem popsat základní typy a jejich hlavní modifikace.

2. Optické kvantové generátory

Vlastní název LASER vznikl jako zkratka sestavená z počátečních písmen anglického názvu Light Amplification by means of Stimulated Emission of Radiation „zesílení světla s využitím stimulované emise záření“. Pojem stimulované emise záření zavedl A. Einstein, který se v r. 1917 zabýval problémem vzájemného působení atomů a fotonů. Až do jeho doby byly známy dva způsoby, při nichž si tyto částice vyměňovaly energii, a to absorpce a emise.

Generátory koherentního záření se nazývají zářiče, které pracují na principu indukované emise záření buď v pásmu velmi krátkých rádiových vln - masery, nebo optickém pásmu - lasery. Zářiče mohou pracovat nejen na principu indukované emise, ale také na stimulované nebo vynucené emisi. Atom ve vybuzeném energetickém stavu, může přejít do nižšího – základního energetického stavu, pomocí působením elektromagnetického pole. Přejít z energeticky vyšší hladiny způsobuje právě elektromagnetické vlnění, které sráží atom na hladinu nižší nebo základní. Tento jev nastává právě tehdy, mají-li dopadající fotony energii právě rovnou rozdílu energií příslušných stavů. Atom v nižším kvantovém stavu absorbuje dopadající záření a přechází do stavu vyššího. V tomto vybuzeném stavu však atom nezůstane trvale. Existuje jistá pravděpodobnost, že atom přejde do stavu s nižší energií, přičemž vyše zase emisi kvant. Toto samovolné záření je náhodný proces a platí pro něj statistické zákony. Z hlediska vlnové optiky vede indukovaná emise ke zvětšení intenzity elektromagnetické vlny, která prochází touto látkou. Přitom frekvence, směr šíření, fáze a polarizace vlny se nemění. Indukované záření je koherentní s procházejícím světlem. Při dopadu záření, které absorbuje atom v nižším kvantovém stavu, přechází do stavu vyššího. [1]

2.1. Objev laseru

Pokud bychom chtěli objasnit objev laseru, měli bychom mít na mysli objev základního principu, stimulované emise na, níž je laser založen. Důležité bylo také vyřešení vytváření aktivního prostředí. Sama konstrukce laseru jako technologického zařízení představuje epochální vynález. Abychom si uvědomili historické souvislosti vzniku laseru, musíme sledovat paralelní vývoj dvou vědeckých oblastí, a tj. radiotechniky a optiky.

Radiová technika využila stále kratší vlnové délky rádiových vln. Od dlouhých a středních vln přešla k vlnám krátkým a umožnila rozkvět radioamatérského vysílání. Krátké rádiové vlny, šířící se směrově, umožnily díky odrazu od ionosféry spojit kontinenty a na krátkovlnné stupnici se začaly objevovat rádiové stanice. Směrovost krátkých rádiových vln, přiměla vědce k myšlence využití těchto vln k určování polohy vysílačů, nebo kovových předmětů, letadel a lodí, které svým povrchem odrážely tyto vlny. K přesnému určování polohy bylo třeba přejít ke kratším vlnám, metrovým, decimetrovým a centimetrovým. Tímto došlo k vynálezu radiolokace, známé pod pojmem radar. První radarové systémy se uplatnily na počátku čtyřicátých let postupně u všech válčících stran. Není pochyb, že sehrály důležitou roli ve druhé světové válce. [1]

2.2. Světelné zdroje

Byl to James Clerk Maxwell, jenž zjistil, že světlo má charakter elektromagnetických vln o velmi krátké vlnové délce. Přitom byly známé světelné zdroje dvojího druhu. Zahřátá tělesa a luminiscenční látky.

Zahřátá tělesa využívají tepelné energie chaotického pohybu atomů, které při vzájemných srážkách excitují. Tím vyzařují elektromagnetické vlny v širokém spektrálním rozsahu, které závisí na teplotě tělesa. Proto také barva zahřátých těles při vzrůstu teploty se postupně mění od červeného do bílého žáru.

Luminiscenční látky vydávají takzvané studené světlo a využívají k tomu nejrůznějších druhů energie. Toto luminiscenční světlo je charakteristické svým zabarvením a je vyzařováno v poměrně úzkých spektrálních pásmech.

V obou případech jde ovšem o záření nekoherentní. [1]

2.3. Oscilační obvod

Aby mohly být realizovány vysílače a přijímače mikrovln, bylo nutné vyřešit otázku oscilačního odvodu. Protože zde se pracuje s kmitočty desítek a stovek megahertzů, nemůže být použit klasický obvod s induktorem a kapacitorem. Induktor pro tyto kmitočty by musel mít méně než jeden závit a tak se uplatnily tzv. dutinové rezonátory.

Elektromagnetické vlny uzavřené do kovové dutiny s dokonale rovnými a postříbřenými stěnami. V této dutině se vlny mnohonásobně odrážejí od protilehlých stěn. Vznikne systém stojatých vln a je-li vlnová délka těchto vln srovnatelná s geometrickými rozměry dutiny, bude rezonátor oscilovat právě na kmitočtech těchto vln.

Odvod může být laděn například změnou délky dutiny. Mikrovlny se pak přenášejí nejčastěji pomocí vlnodů, nebo dutých trubíc nejčastěji obdélníkového průřezu s vodivým vnitřním povrchem nebo koaxiálním kabelem.

Další zkracování vlnových délek přineslo opět nové problémy. Při přechodu k milimetrovým vlnám jsou již dutinové rezonátory příliš malé a také není lehké je vyrobit. Radiotechnika tedy přešla od dlouhých kilometrových rádiových vln k vlnám milimetrovým a zde se zastavila. Nezpůsobila to jen potíž s konstrukčním řešením dutinových rezonátorů, ale i to, že neexistovaly zdroje koherentních, tedy v radiotechnice použitelných elektromagnetických vln. [1]

2.4. Fabryho-Perotův interferomet

Ke konstrukci laserů však stále zbýval obtížný problém, jak vytvořit odpovídající rezonanční obvod, kde by mohlo světelné záření oscilovat a hromadit energii. Nakonec se ukázalo, že není nutné, aby rezonátor měl rozměry srovnatelné s vlnovou délkou světla, což se do té doby pokládalo za nepřekonatelnou překážku.

Objevila se možnost použít takzvaných otevřených rezonátorů, v nichž se paprsek mnohonásobně odráží od dvou rovnoběžných zrcadel, mezi než umístíme aktivní prostředí. Při každém odrazu probíhá paprsek opětovaně aktivním prostředím, tím sílí a nabývá na energii. Po mnoha tisících odrazech je nakonec vyveden ven polopropustným zrcadlem na jednom konci systému. Princip to byl tedy jednoduchý, v podstatě šlo o známý Fabry-Perotův interferometr. V některých případech nebylo nutno vytvářet zvláštní zrcadla, stačilo vyleštit koncové plochy krystalu.

Problém rezonátoru byl tedy vyřešen, postupně se jeho konstrukce i teorie zdokonalovaly a rozvíjely. Byla používána rovinná i kulová zrcadla, na nichž výkon laseru závisel. Paprsky, které byly schopny vykonat velké množství odrazů v rezonátoru se podílely laserové akci. Ostatní opouštějí rezonátor dříve, než stačily zesílit. Konstrukce otevřeného rezonátoru přispěla k tomu, že paprsek vycházející z rezonátoru má malou rozbíhavost. Při tom je však ještě možnost jej dále zaostřovat optickými systémy. Vedle koherence, spořádanosti, která předurčuje laserový paprsek k přenosu informace, vzniká ještě vysoká koncentrace světelné energie jak v čase (díky krátkosti laserového záblesku), tak v prostoru (díky možnosti zaostřit jej na velmi malou plošku).

Koncem padesátých let bylo tedy zřejmé, že je zde možnost sestrojít principiálně nový zdroj světla. Bylo nutné zvolit vhodnou látku k vytvoření aktivního prostředí, dodat jí větší množství energie a umístit ji mezi zrcadla otevřeného rezonátoru.

T. H. Maiman zvolil tyčinku umělého rubínu a její koncové plochy rovnoběžně vybrousil. Po vyleštění je postříbřil a ozářil světlem výbojky. Jedním z konců tyčinky pak vyšlehl rudý paprsek v krátkém pulsu, s vysokou monochromaticností a malou rozbíhavostí. Je s podivem, že tato událost nevzbudila zpočátku přílišný rozruch. V té době byla totiž redakce časopisu Physical Review

Letters zahrnuje různé články na toto téma. Tudíž se veřejnost o tomto objevu dozvěděla se zpožděním několika měsíců. [1]

2.5. Aktivní prostředí

Aktivní prostředí je soubor částic schopných pod vlivem dodání vnější energie generovat stimulované záření. Jako aktivní prostředí laserů se využívají směsi některých jednoatomových plynů, nejznámější je směs helia a neonu. Některé molekulové plyny např. CO₂, N₂ a u tzv. excimerových laserů jsou to ionizované plyny atomů s uzavřenou valenční slupkou např. argon a krypton. Uplatnění našly také lasery, jejichž aktivní prostředí je tvořeno směsí helia s excitovanými parami kovů např. helium-kadmiový laser. Aktivní prostředí mohou tvořit i pevné látky. V praxi se užívají polovodiče nebo izolanty s vhodnou šířkou zakázaného pásu. Tyto materiály jsou aktivovány příměsí iontů tak, aby byl v zakázaném pásu vytvořen lokalizovaný hladinový systém. Nejznámější je rubín – Al₂O₃ aktivovaný ionty chromu, sklo s příměsí neodymu. U polovodičových laserů pro viditelnou oblast se např. užívá přechod PN mezi InGaP a InGaAlP vybudovaný v krystalu GaAs. Existují rovněž i kapalinové laditelné lasery, kde je vyvolán sekundární laserový efekt v roztocích vhodných barviv umístěných v rezonátoru. Jako primární zdroj laserového záření je u těchto laserů používán laser emitující v ultrafialové oblasti. Cesta k nalezení vhodných aktivních prostředí nebyla snadná. Teoretické a experimentální výzkumy trvaly více než 40 let, od prací Alberta Einsteina z roku 1916 až po spuštění první maseru v roce 1954 a prvního laseru v roce 1960. [3]

3. Základní vlastnosti laserového prostředí

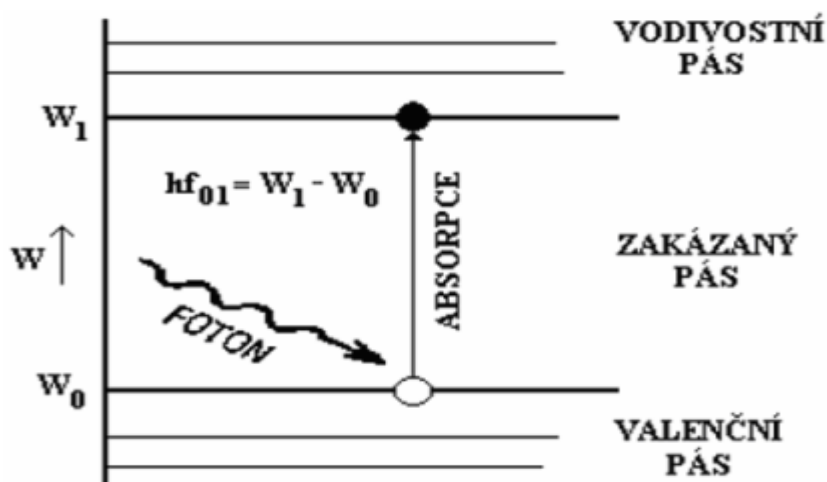
Pro činnost laseru je využitelná pouze emise stimulovaná a je nutné zajistit, aby co nejvíce atomů nebo molekul v aktivním prostředí bylo ve vybuzeném stavu. Znamená to, že na vyšších energických hladinách musí být více částic než na hladinách nižších. Tento stav se nazývá inverzní populace. Při dopadu fotonu příslušné frekvence na tento systém dojde ke stimulaci excitovaných částic a vyzáření fotonů stejné vlnové délky, polarizace a směru pohybu jako původní foton. Každý z těchto fotonů může stimulovat další atomy a dochází tak k postupnému zvyšování počtu fotonů a zesilování původního záření. [3]

3.1. Absorpce energie kvantovými systémy

Elektrony se dostávají do stavu excitace (vybuzení) v důsledku absorpce (pohlcování) energie. Vlivem absorpce energie přeskóčí elektron na vyšší energetickou hladinu. Je důležité si uvědomit, že foton je absorbován (elektron přeskóčí na hladinu s větší energií) jen tehdy, je-li jeho energie rovná rozdílu mezi energií odpovídající té hladině, na niž se elektron dostává a energií hladiny, na niž se elektron před skokem pohyboval. Při absorpci dopadá na atom foton a odevzdá mu svoji energii, atom přejde na vyšší energetickou úroveň, na níž může jistou omezenou dobu setrvat – to je tzv. doba života vybuzeného atomu. Dříve nebo později se však vzbuzený atom vrátí na svoji původní hladinu s nižší energií a rozdílovou energii vyzáří. V takovém případě mluvíme o zářivém přechodu, nebo ji předá ve formě tepla svému okolí – nezářivý přechod.

V případě většího souboru částic jednotlivé atomy absorbují a emitují fotony nezávisle na sobě. Vzniklé záření má zcela nahodilou fázi, frekvenci amplitudu a proto není monochromatické a málo intenzivní. Vzhledem k tomu, že k aktu emise fotonů dochází náhodně, nazývá se tento typ záření spontánní. Toto záření vydává každé zahřáté těleso, např. vlákno žárovky nebo atomy plynu, buzené náhodnými srážkami v elektrickém výboji. K vysvětlení absorpce energie fotonu kvantovou soustavou můžeme využít energický pásový model polovodiče na obr.1. [5]

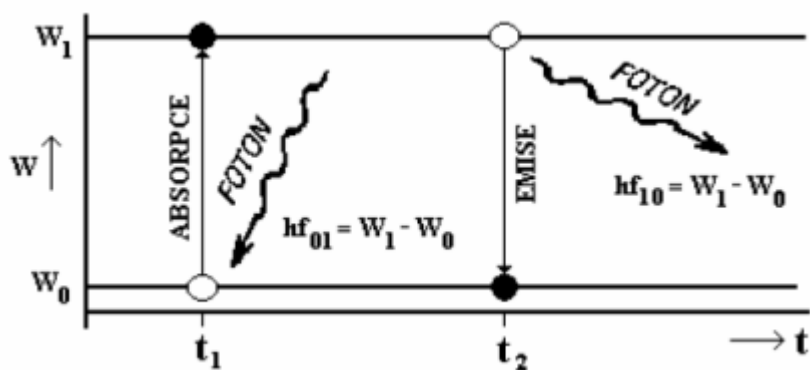
Veličina W vynášená na svislou osu energetického modelu kvantových soustav se skládá z kinetické energie elektronu, z potenciální energie elektronu v poli jádra atomu, z elektrostatické energie vzájemného působení elektronu a z energie související se spinem elektronu. Obr. 1 zachycuje několik nejvyšších energetických hladin valenčního pásu, zakázaný pás a několik hladin vodivostního pásu. Pro absorpci i emisi viditelného světla, nebo infračerveného záření, jsou vhodné látky, které mají zakázaný pás široký několik elektronvoltů, tedy polovodiče. [5]



Obr.1. Energetický model absorpce částice

3.2. Spontánní emise záření

Jedná se o samovolné vyzařování elektromagnetického pole vzbuzenými kvantovými částicemi (atomy, ionty, molekulami). Při spontánní emisi není nezbytná přítomnost vnějšího elektromagnetického pole. Vzbuzená částice přechází z vyšší energetické hladiny na hladinu s nižší energií. To se děje samovolně, a při tom se vyzařuje elektromagnetické záření. Směr šíření, fáze i polarizace vysílaného záření jsou náhodné. Pravděpodobnost spontánní emise je dána vlastnostmi kvantových stavů, mezi kterými ke kvantovému spontánnímu přechodu dochází. Vyzářené elektromagnetické záření se nazývá spontánní záření. [5]



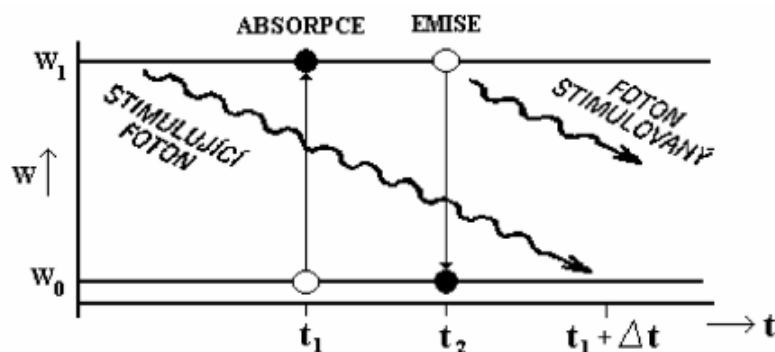
Obr.2. Energetický model spontánní emise, doplněný o časovou osu

V okamžiku t_1 je kvantovou soustavou absorbován foton. Energie tohoto fotonu by měla být rovna rozdílu energii obou uvažovaných energetických hladin. Jinými slovy, v okamžiku t_1 došlo k absorpci elementárního kvanta záření určité vlnové délky. Po uplynutí krátkého časového intervalu, v okamžiku t_2 , přejde kvantová soustava zpět do základního stavu. Protože se jedná o přeskok elektronu mezi stejnými energetickými hladinami (W_1 a W_2), vyzáří se světelné kvantum mající stejnou energii jako to, které bylo v okamžiku t_1 absorbováno. [5]

3.3. Stimulovaná emise záření

Jedná se o vynucené záření. Vyzařování elektromagnetického pole vybudnými kvantovými systémy (atomy, ionty, molekuly), které je vyvolané působením vnějšího stimulujícího záření s frekvencí rovnou frekvenci některého kvantového přechodu.

Směr šíření, frekvence, fáze i polarizace stimulovaného záření jsou shodné s frekvencí stimulujícího záření. Je-li buzením dosaženo inverze populace, převládá stimulovaná emise nad absorpcí. Prostředí zesiluje rezonanční elektromagnetické záření. Stimulovaná emise je základním procesem probíhajícím v kvantových zesilovačích. Tento jev byl teoreticky předpovězen A. Einsteinem již v roce 1916 na základě analýzy vyzařování látek v termodynamické rovnováze. [2]

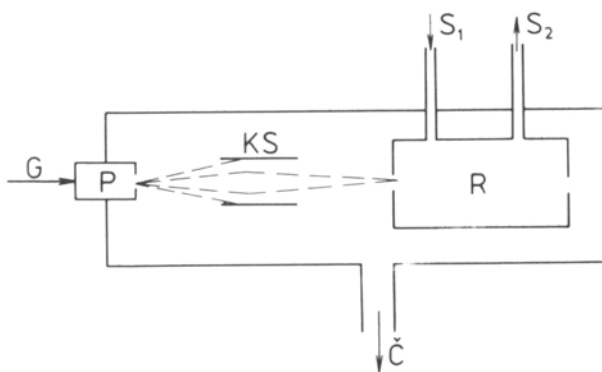


Obr.3. Energetický model stimulované emise záření

Model stimulované emise je popsán na nejjednodušším případě kvantové soustavy se dvěma energetickými hladinami. V okamžiku t_1 dojde k excitaci uvažované soustavy. Po uplynutí určitého časového intervalu Δt by soustava přešla spontánně zpět do základního tvaru, přičemž by byl vyzářen foton s energií $W_1 - W_0$ nahodilého směru šíření a nahodilé fáze. Přivedeme-li však do soustavy foton s energií rovnou energetickému rozdílu uvažovaných hladin v časovém okamžiku t_2 , který předchází okamžiku vzniku spontánní emise, přejde kvantová soustava do základního stavu již v okamžiku t_2 . Foton, který svou přítomností tento přechod způsobil, se nazývá stimulující. Přechod soustavy do stavu s nižší energií vyvolaný stimulujícím fotonem je doprovázen vyzářením fotonu, který má stejnou energii, stejný směr šíření, stejnou fázi i polarizaci vlnění jako foton stimulující. Stimulující foton nebyl uvažovanou kvantovou soustavou pohlcen, pouze soustavou prošel a k němu se přidal foton stimulovaný. Efektu stimulované emise záření lze dosáhnout v nepřeberném množství aktivních prostředí. V rutinní praxi se však používání laserů omezilo jen na několik typů, ve kterých lze záření jednoduše detekovat. [5]

4. MASER (mikrovlnný kvantový generátor)

Jedná se o zdroj koherentního záření v mikrovlnné oblasti, jenž využívá jevu stimulované emise. Maser využívá jako aktivního prostředí molekulárního svazku, z něhož jsou odděleny částice na vyšší energetické hladině pomocí nehomogenního magnetického pole. Tyto částice předávají energii mikrovlnnému rezonátoru. Předností maseru je vysoká monochromaticnost generovaného záření a také vysoká stabilita frekvence. Proto je maser užíván jako frekvenční standart, zvláště vodíkový maser je používán jako atomové hodiny. Nedostatkem maseru je velmi malý generovaný výkon. V roce 1957 byl navržen a realizován tříhladinový maser používající aktivní prostředí v pevné fázi. Předností těchto typů maserů je možnost optického buzení aktivního prostředí. Nevýhodou je menší frekvenční stabilita. [2]



Obr. 4. Schéma maseru s molekulárním svazkem. G – přívod plynu, P – generátor vybuzených částic, KS – kvadrupólový selektor, R – mikrovlnný rezonátor, S₁ – vstup signálu, S₂ – výstup signálu, Č – vakuové čerpadlo

4.1. Separáční maser

Látkou, kter posloužila jako aktivní prostředí prvnímu kvantovému generátoru se stal amoniak. Molekula amoniaku má tvar ˇtyřstenu, kde podstava je tvořena třemi molekulami vodíku a vrchol molekulou dusíku. Molekula vykonává rzn rotačn a kmitav pohyby. Nejzajmavší je takzvan pohyb inverzní, kdy se atom dusíku střdav přblžuje a oddaluje od základny, kde na něj působí odpudiv síly vodíkových atomů. Po mnoha nezdařených pokusech se mu podaří dostat skrz a vytvoří se molekula zrcadlov shodn. Průchod dusíku umožňuje takzvan tunelov jev. Molekuly amoniaku (NH_3) pohlcují velmi siln mikrovlny s frekvencí $2,387 \cdot 10^{10}$ Hz a vlnovou délkou záření $12,559 \cdot 10^{-3}$ m, s kterou kmit atom N kolmo k rovině atomů H. Středn hodnota elektrického dipólového momentu molekul NH_3 je sice nulov, ale v elektrickm poli se atom N zdrží dále v jedné poloze než v opačn. Oba stavy molekuly se liší znaménkem elektrického momentu a mají různé energie E_1 a E_2 . V nehomogenním elektrickm poli jsou molekuly vyšší energií E_2 odchylovány ve směru klesajícího pole, naopak molekuly s nížší energií E_1 ve směru rostoucího pole. Toto vyuil r. 1955 Townes, Gordon a Ziger ke konstrukci separačního maseru. [2]

Aktivní částice	Frekvence přechodu (GHz)	Vlnov délka záření λ (m)
$^{14}\text{NH}_3$	23,78	$1,26 \cdot 10^{-2}$
CH_2O	72,83	$0,40 \cdot 10^{-2}$
ND_3	1,50	$20,00 \cdot 10^{-2}$
H_2	1,42	$21,00 \cdot 10^{-2}$

Tab. 1. Přehled různých typů maserů a jejich parametrů

5. Lasery

5.1. Pevnolátkové lasery

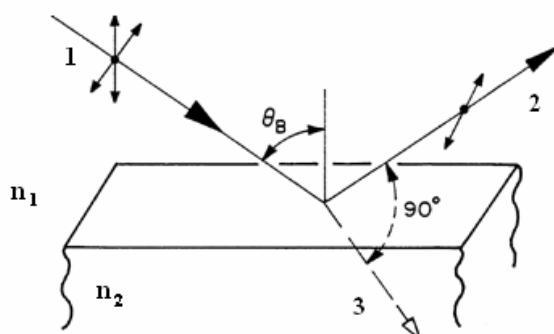
Aktivní prostředí této skupiny laserů tvoří pevné krystalické látky dopované příměsí vhodných iontů. Pevná fáze tvoří vlastně jen nosný skelet aktivního prostředí. K optickému zesilování dochází na elektronových přechodech iontů příměsí. Jejich koncentrace málokdy překročí 1%. U krystalických materiálů jsou aktivní ionty zabudovány v krystalické mřížce a mají stálou, orientovanou polohu v silovém poli mřížky. Optické a mechanické vlastnosti jsou směrově závislé, tato vlastnost se nazývá anizotropie krystalů. Slouží-li jako aktivní prostředí, musí být krystal přesně orientován podle optických os.

Jako příměsí krystalických aktivních prostředí se nejčastěji používá iontů ze skupiny prvků vzácných zemin. Jsou to zejména Nd^{3+} , Sm^{2+} , Tm^{3+} , Pr^{3+} nebo také prvky Cr^{3+} , U^{3+} . Ionty příměsí jsou v krystalu vystaveny působení poměrně velkých vazebních sil, které mohou ovlivnit energetické hladiny jejich valenčních elektronů.

Jako nosného prostředí pro aktivní ionty se používá i amorfních materiálů – skel. Aktivní ionty např. Nd^{3+} , Ho^{3+} , Gd^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+} jsou rozptýleny ve skelných materiálech. V nich vytvářejí „pevné roztoky“, které jsou na rozdíl od krystalů izotropní a jejich optické a mechanické vlastnosti nezávisí na prostorové orientaci materiálů. Energetické hladiny iontů jsou však silně ovlivněny interakcemi se stavebními kameny amorfních nosných skeletů.

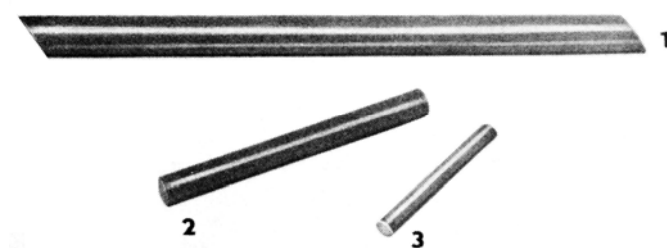
Materiál aktivního prostředí krystalické povahy tvoří často oxid hlinitý Al_2O_3 . Jedná se o rubín dopovaný ionty Cr^{3+} . Oxid hlinitý je základem i pro další důležitý materiál, yttrito-hlinitý granát se sumárním vzorcem $\text{Y}_2\text{Al}_5\text{O}_{12}$. Základ aktivního prostředí YAG laseru se získá dopováním tohoto materiálu ionty Nd^{3+} . Kromě těchto materiálů se jako nosné používají fluorid vápenatý a wolfram vápenatý (CaF_2 a CaWO_4) a některé další. [3]

Aktivní prostředí z těchto materiálů se obvykle formuluje do tvaru válečku, a tím se tvarem přizpůsobuje optickému rezonátoru. Jsou-li konce válečků zbroušeny s velkou přesností kolmo k optické ose a pečlivě vyleštěny, tvoří planparalelní konce vlastní rezonátor. K tomu je třeba ještě kolmo zabroušené konce opatřit odraznými vrstvami, buď napařením kovové, nebo selektivně odrazné dielektrické vrstvy. Konce válečků mohou být také zkoseny pod Brewsterovým úhlem, viz Obr. 5. Úhel dopadu svazku paprsků optického záření na rozhraní dvou dielektrických prostředí, při kterém dochází k odrazu jen záření lineárně polarizovaného v rovině kolmé k rovině dopadu. Záření s polarizací v rovině dopadu prochází rozhraním bez odrazu.



Obr. 5. Brewsterův úhel Φ_B : n_1 , n_2 – rozdílné indexy lomu prostředí, 1 - směr dopadu, 2-směr odraženého záření, 3-směr záření procházejícího rozhraní

Při výrobě válečků či tyčinek z anizotropních krystalických materiálů je třeba materiál přesně orientovat podle krystalových os, u izotropních skelných materiálů tato potřeba odpadá. K omezení odrazů na stěnách se jejich povrch pokrývá vrstvou materiálu s menším indexem lomu. Tím se zvětšuje i účinnost buzení a zabraňuje se generaci parazitních módů po odrazu ze stěn. [2]



Obr. 6. Příklady pevnolátkových aktivních materiálů: 1 – Nd sklo, 2 – rubínový krystal, 3 – Nd : YAG krystal

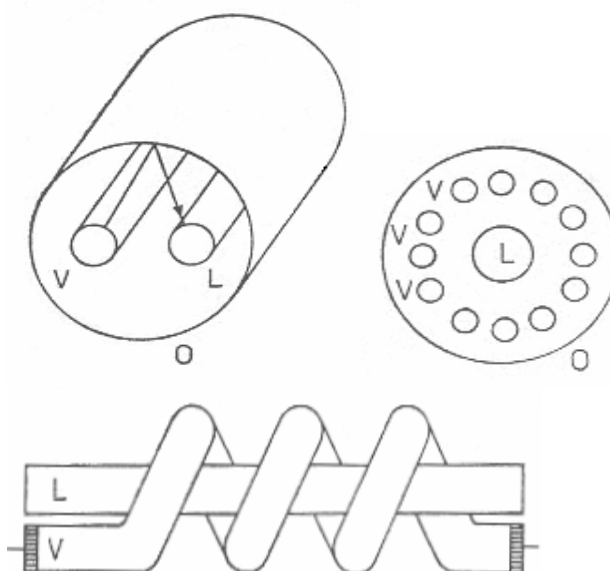
Buzení pevnolátkových laserů

U pevnolátkových laserů se takřka výlučně používá optické buzení, při němž se pomocí vnějšího světelného zdroje vyvolá změna v obsazení energetických hladin. Jako horní laserové hladiny se obvykle využívá metastabilní hladiny s dlouhou dobou života, a je naopak výhodné, když doba života spodní laserové hladiny je co nejkratší. Absorpční a relaxační vlastnosti hladin jsou silně ovlivněny interakcí iontů s krystalickou mřížkou a vlastními kmity mřížky. K odstranění interakcí s mříží se někdy aktivní prostředí ochlazuje až na teploty kapalného dusíku.

Materiál se zabudovanými ionty se vkládá do světelného pole budícího zdroje. Z něho získává energii pohlcením záření na rozšířených absorpčních čarách přechodů v aktivních iontech. Nezářivými přechody ze vzbuzených hladin je obsazována metastabilní hladina tvořící horní laserovou hladinu. K zesílení dochází na přechodu mezi ní a některou nižší, málo obsazenou hladinou. Budícím zdrojem bývá výbojka naplněná obvykle xenonem či rtutí, pracující dle potřeby buď v kontinuálním, nebo v impulsním režimu. Pevnolátkové lasery častěji pracují v impulsním režimu. Konstrukce laseru s kontinuálním provozem je podstatně složitější.

Různé modifikace pevnolátkových laserů

U prvních laserů byly krystaly umísťovány do osy spirálně stočené výbojky, později bylo používáno různých druhů odražečů, např. eliptického odrazového válce, v jehož ohniskových přímkách jsou umístěny krystal a výbojka. [3]

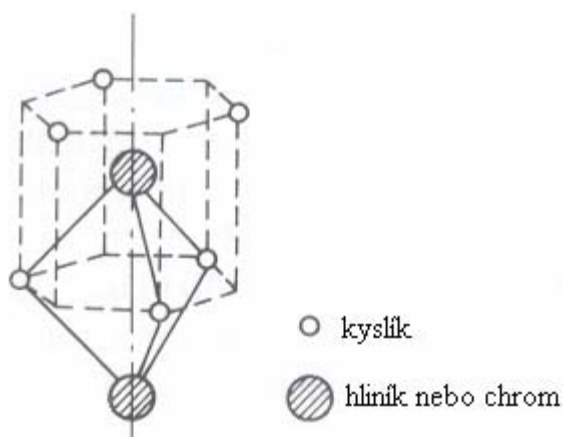


Obr.7. Různé modifikace pevnolátkových laserů: L – laserový krystal, V – výbojka, O – odrazná plocha

Z celkové energie záření emitované výbojkou je k buzení využívána jen malá část. Spektrální oblast potřebná k buzení bývá obvykle poměrně úzká a nevyužitá část energie výbojky (především její infračervená složka) způsobuje jen parazitní ohřev krystalu. [3]

5.1.1. Rubínový laser

Rubínový laser byl první realizovaným. Jako aktivní prostředí nebyl rubín zvolen náhodně. Byl zkonstruován T. H. Maimanem v roce 1960. K jeho stavbě přispěla značná zkušenost s optickými vlastnostmi materiálu nosného prostředí korundu Al_2O_3 . Jeho vlastnosti byly dobře známy z předchozího vývoje maserů jeho výroba v průmyslovém měřítku byla velmi dobře zvládnuta. Jelikož syntetický rubín byl používán pro ložiska v hodinářském průmyslu a také jako náhrada přírodního rubínu ve šperkařství. Pro využití v laserové technologii bylo nutno podstatně snížit koncentraci atomů Cr^{3+} . Rubín je vlastně safír, v němž malá část trojmocných iontů hliníku je zaměněna ionty Cr^{3+} . Podle jejich koncentrace se mění zbarvení rubínu. U krystalů pro průmyslové použití je koncentrace asi 0,5 % váhových, zbarvení je temně červené. Pro laserové krystaly je koncentrace nízká jen 0,05 % a zbarvení je růžové. Doba života aktivní částice na vybuzené úrovni je poměrně dlouhá ($\tau = 3$ ms při pokojové teplotě) a zvětšuje se s klesající teplotou $\tau = 4,2$ ms při 3 K). [2]



Obr.8. Schéma krystalické mřížky rubínu

Výroba krystalu rubínu

Krystaly rubínu pro laserové použití lze synteticky vyrábět dvěma metodami. Nejrozšířenější metodou vypracovanou pro výrobu rubínu užitého pro průmyslové účely je tzv. Verneuilova metoda, při níž krystal roste z taveniny v plameni. Výchozími složkami při výrobě jsou práškový korund a oxid chromu, které se taví v oxidovodíkovém plameni při teplotě asi 2000°C. Na zárodku vyrůstá tzv. hruška, jejíž typickým průměrem je 2cm a délka 15cm. V další fázi se z těchto hrušek vybrušují válcové tyčinky. [2]

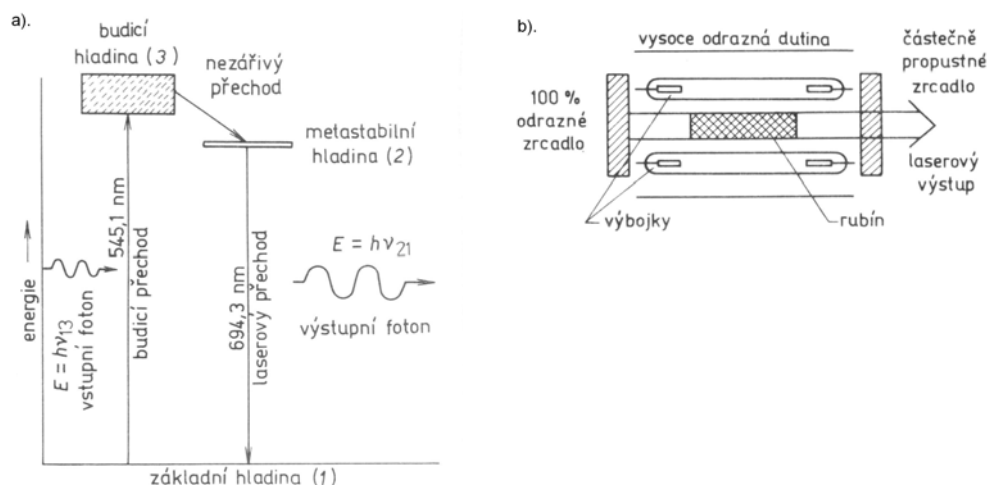
Druhou metodou je pěstování krystalu v roztoku. Jedná se o tzv. metodu Czochralskiho. Vypěstované krystaly jsou opticky homogennější, jejich velkým nedostatkem je rozdělení indexu lomu ve směru poloměru. Největší hodnoty dosahuje index lomu na ose krystalu, směrem k okraji klesá. Z hlediska šíření optického záření působí takový krystal jako spojná čočka, která fokusuje šířící se záření k ose krystalu. To může mít za následek vnitřní mechanické poškození krystalu. Zvláště je-li provozován v režimu pro generování obřích impulsů.

Rubín je dvojlomným materiálem a z hlediska dynamiky generace stimulovaného záření je představitelem tříladinového systému. Z úvah o stimulované emisi vyplývá závěr, že pro určité aktivní prostředí je generovaná energie úměrná objemu aktivního prostředí. Při použití rubínu jako aktivního prostředí je objem jednoho elementu omezen asi na 10cm³. Pokusy o objemnější krystaly jsou velmi nákladné a většinou končí nezdarem. Při větší délce se krystaly deformují a jsou tedy pro laser nepoužitelné. Vytváření větších aktivních objemů, např. skládáním nebo spojováním jednotlivých elementů je sice možné, ale přináší řadu nevýhod. Tyto nevýhody jsou zejména odrazy na rozhraní, nežádoucí interference a zhoršené podmínky chlazení. Proto se hledá a ověřuje celá řada jiných aktivních prostředí.

Jakmile je z rubínu vybroušena tyčinka, jsou její konce podle potřeby zabroušeny buď to kolmo k podélné ose, nebo pod Brewsterovým úhlem. Po nanesení odrazných vrstev, nebo umístění do vnějšího rezonátoru a vložení do budícího záření je laser schopen funkce. Je třeba zdůraznit, že každá z popsaných operací vyžaduje technickou zkušenost a také přesnost. Na kvalitě monokrystalu a jeho finálním opracování závisí do značné míry podmínky generace i velikost ztrát. [2]

Funkce rubínového laseru

Rubínový laser se skládá z laserové hlavice, zdroje pro buzení a chlazení. Základem laserové hlavice je aktivní prostředí – monokrystal rubínu, otevřený rezonátor a budící výbojka. Krystal a výbojka jsou umístěny v budící dutině zkonstruované tak, aby co nejvíce světla z výbojky dopadalo do aktivního prostředí. [2]



Obr. 9a. Tři hladiny iontu chrómu v rubínovém krystalu – zjednodušené schéma.
Obr. 9b. Schéma rubínového laseru.

K funkci rubínového laseru se využívá tří energetických hladin rubínu. Budící světlo s kmitočtem ν_{13} způsobuje přechod z hladiny 1 na hladinu 3. Atomy v excitovaném stavu 3 se mohou vrátit do základního stavu 1 spontánně nebo přes metastabilní hladinu 2. Doba života hladiny 2 je 10^5 krát větší než doba života hladiny 3. Rychlost s jakou narůstá populace hladiny 2, je úměrná budicímu výkonu. Je-li tato rychlost dostatečná, pak obsazení hladiny 2 roste a nastává inverze populace mezi hladinami 1 a 2. Krystal rubínu pak může zesilovat záření s kmitočtem ν_{21} . Při existenci rezonátoru pracuje systém jako oscilátor a je generováno laserové záření, které vystupuje polopropustným zrcadlem. Záření je složeno z mnoha maxim nepravidelně rozmístěných v čase. Laserová akce pokračuje až do vypnutí buzení

Celková účinnost rubínového laseru je menší než 1%. Většina energie se rozptýlí v krystalu ve formě tepla. Z tohoto důvodu je chlazení důležitou součástí tohoto laseru. [2]

5.1.2. Laser s neodymovým sklem

Brzy po úspěchu rubínového laseru byly realizovány lasery s jinými krystaly, založené většinou na čtyřhladinovém principu. U těchto laserů se dosahuje rychlého růstu populace horní pracovní energetické hladiny a naopak rychlého uvolňování spodní pracovní hladiny. Jeden z prvních čtyřhladinových laserů s krystalem fluoridu a příměsí iontů uranu nebo samaria začal pracovat již v roce 1960 a vystačil s pětkrát menším čerpacím výkonem než Míamanův laser. Jeho autory byly P. P. Sorokin a M. J. Stevenson z laboratoří firmy IBM. Většího rozšíření však dosáhly lasery s ionty neodymu, vyzařující infračervené záření o vlnové délce 1,058, resp. 1,064 μm . Nejrozšířenější jsou lasery s neodymovým sklem, kde jsou ionty neodymu rozptýleny ve skleněné matici a lasery YAG s krystalem yttrio. Což je hlinitý granát dotovaný neodymem. Důvodem použití neodymového skla je to, že může být na rozdíl od krystalů vyráběno prakticky v neomezených rozměrech. Pokud jde o YAG lasery, ty se vyznačují vysokou účinností. Stačí je osvětlit pouhou žárovkou a mohou vydávat spojitě laserové světlo o výkonu stovek wattů. V pulzním režimu je neodymový laser schopen dosáhnout výkonu až 10^6 MW. Proto se tento laser používá pro generaci laserového plazmatu a pro výzkum termojaderné syntézy inicializované laserem. [2]

5.1.3. Nd: YAG laser

Nosným prostředím je opticky izotropní granát s příměsí asi 1,5 % objemových iontů neodymu. Vyšší koncentrace nejsou možné, neboť krystal vlivem rozdílných poloměrů iontů Y^{3+} a Nd^{3+} v důsledku vnitřního pnutí praská a není tedy vhodný. Z hlediska počtu hladin nezbytných pro generaci stimulované emise patří do skupiny čtyřhladinových systémů. Jeho účinnost je poměrně dobrá, asi 1 %. Nejintenzivnějším přechodem je přechod odpovídající vlnové délce $\lambda=1,0641 \mu\text{m}$. Tepelná vodivost granátu dovoluje účinné chlazení aktivního prostředí. Chlazení je realizováno např. vodou. Granátový laser lze provozovat v kontinuálním režimu při čerpání kryptonovou výbojkou a dosahovat generace vysokých výkonů 100 – 200W s vysokou energií 1 J a opakovací frekvenci 100 Hz v impulsním režimu. V současnosti se jedná o nejrozšířenější pevnolátkový laser. Toto jsou důvody proč granátový laser nachází stále širší uplatnění v průmyslu, např. při sváření, vrtání a žíhání materiálu, v lékařství jako tzv. nekrvavý skalpel. Ve výzkumných laboratořích je používán zejména jako řídicí oscilátor ve velkých systémech s několika zesilovači. V nelineární optice je jeho užití jako zdroj koherentního záření, popřípadě jako zdroj ultrakrátkých impulsů. [1]

5.1.4. Polovodičové lasery

Využití P-N přechodu jako aktivního prostředí laseru bylo navrženo na samém počátku rozvoje kvantové elektroniky. Však nejdynamičtějšího rozvoje dosáhl tento typ koncem dvacátého století. Vývoj polovodičového laseru úzce souvisel s rozvojem vláknové a integrované optiky, která pro své miniaturní rozměry je ideálním komponentem pro ostatní optické elementy. V polovodičovém laseru se na rozdíl od ostatních využívá přechodu mezi valenční a vodivostní zónou. K zesílení záření dochází na přechodu mezi zónami, pro který je splněn Bohrovův vztah.

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (2)$$

Kde E_2 je energie hladiny ležící ve vodivostním pásu a E_1 energie hladiny ve valenčním pásu. Uvnitř jednotlivých zón dochází k nezářivému přechodu

Polohu hladiny uvnitř zón lze ovlivňovat koncentrací příměsí polovodiče nebo vnějším působením na přechod, např. tlakem nebo teplotou. Proto lasery využívající stejného aktivního prostředí, mohou generovat na mírně odlišných frekvencích. Tohoto poznatku lze využít i pro řízení změny frekvence laseru. Pro čerpání polovodičového laseru lze využít optického čerpání, tzn. světelné záření vnějšího, zpravidla nekoherentního zdroje. Optického čerpání a bombardování se používá převážně ve výzkumu polovodičových laserů. V aplikacích převažuje injektování, které je poměrně jednoduché. Budícím zdrojem je zpravidla zdroj napětí používaný běžně v polovodičové technice.

Vzhledem k malým rozměrům přechodu je dosahována hustota proudu velmi vysoká 10^6 - 10^7 A.m⁻². Typické prahové hodnoty budícího proudu jsou 10–100 mA. Výhodou tohoto způsobu čerpání je i to, že vstupní zařízení laseru kopíruje časový průběh budícího proudu. Což podstatně zjednodušuje problém modulace výstupního zařízení. [1]

Polovodičové lasery jsou významné hned z několika důvodů. Jejich hodnota zesílení vztažená na jednotku objemu aktivního prostředí bývá až o tři řády větší než u jiných typů laserů. V důsledku toho pro generaci koherentního záření postačí rezonátor o rozměrech desetin milimetru. U mnohých typů polovodičových laserů je využíváno možnosti plynulého přeladění frekvence záření v poměrně široké spektrální oblasti.

Excitace a generace záření souvisí u polovodičových laserů s tzv. pásovou strukturou jejich hladin. Zatímco u kovů se valenční a vodivostní pásy překrývají, u polovodičů jsou oba pásy odděleny potenciálovou bariérou a k dosažení vodivosti je zapotřebí elektrony vybudit z valenčního do vodivostního pásu. Pro účely stimulované emise vyhovují polovodiče s tzv. přímými zonálními přechody a nehodí se materiály s velkými ztrátami nežádivých procesů.

Aktivní prostředí polovodičových laserů se budí převodem elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Vlastnosti těchto pásů se upravují dopováním polovodičů vhodnými příměsemi. K buzení se nejčastěji využívá injektování proudu přes přechod PN polovodiče. Je to obdobný proces jako u polovodičových diod. Může se však použít i optického buzení, při němž se budící záření fokusuje na povrch polovodiče válcovanou čočkou.

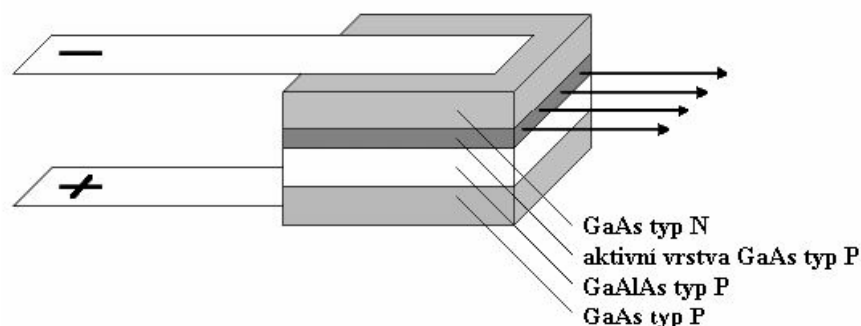
Vzhledem k velkému zesílení postačí jako odrazné plochy rezonátoru využít rovnoběžné konce krystalu. S ohledem na velký index lomu polovodičových materiálů může být odraznost takových ploch kolem 50 %, což při velkém zesílení postačí ke generaci laserového záření. Pokud se aktivní prostředí z krystalu polovodiče umísťuje do vnějšího rezonátoru, je třeba konce krystalu zabrousit pod Brewsterovým úhlem. [1]

Heterostruktura polovodičových laserů

Injekční polovodičové lasery pracují s přechodem PN využívaným v běžných elektronických součástkách. K zářivému přechodu dochází mezi vodivostním pásem příměsí a valenčním pásem. Účinnost polovodičových laserů je mimořádně velká, dosahuje až 70 % a daří se ji neustále zvětšovat. Bohužel však dochází k absorpci v okrajové, neexcitované zóně. V důsledku toho nemůže polovodičový laser dosáhnout teoretické účinnosti 100 %.

Účinnost se zvětšuje pomocí tzv. heterostruktury aktivního prostředí, v níž jsou okrajové části krystalu tvořeny materiálem s větším energickým rozdílem mezi vodivostním a valenčním pásem a s menším indexem lomu. V tomto uspořádání se spojují výhody zmenšení ztrát absorpcí v povrchových oblastech krystalu s efektem vedení světla. Záření se „stlačí“ do prostředí s větším indexem lomu, což vede ke zvětšení účinnosti.

Další výhodou heterostrukturních polovodičových laserů spočívá ve zmenšení hodnoty prahového proudu potřebného k překonání optických ztrát v polovodiči. Potřeba velké budící proudové hustoty je zásadní otázkou pro životnost diod. Heterostruktura je soustava tvořená dvěma nebo několika různými navzájem se dotýkajícími polovodiči. Oblast dotyku obou polovodičů se nazývá heteropřechod. Elektrické vlastnosti, zejména transport nosičů náboje heterostruktury ve směru kolmém na rovinu přechodu mezi polovodiči závisí na detailních vlastnostech obou polovodičů. Heteropřechody se široce využívají pro konstrukci elektronických a optoelektronických součástek, např. bipolárních transistorů, luminiscenčních diod, polovodičových laserů a fotodetektorů. [1]



Obr.10. Heterostrukturní laser s jednou heterostrukturou

První polovodičový laser byl realizován na polovodičové diodě GaAs, která i dosud je představitelem polovodičového laseru. Dokonalejší polovodičové lasery využívají kombinace několika materiálů. Jsou nazývány heterostrukturální polovodiče, jejichž výhodou je zpravidla nižší práh generace a širší oblast emise. V klasickém uspořádání polovodičového laseru (obr.5) protéká kontaktem kov-polovodič proud o hustotě řádu kA/m^2 , což klade značné nároky na technologii výroby těchto prvků. Heterostrukturám vděčíme i za to, že některé heterostrukturální lasery pracují za laboratorní teploty, zatímco u ostatních typů polovodičových laserů je k odstranění ohmických a fotonových ztrát zapotřebí chlazení kapalným dusíkem až héliem.

K zesílení u polovodičových laserů dochází v poměrně úzkém proužku přechodu PN, širokém asi $50 \mu\text{m}$. Zesílení je natolik velké, že se kromě podélných módů v ose přechodu PN vytváří i řada módů šířících se v krystalu odrazy od stěn. Tento efekt způsobuje poměrně velkou rozbíhavost svazku vystupujícího z polovodičového laseru. Použitím heterostruktur s plynulejším přechodem indexu lomu směrem ke stěnám je možno rozbíhavost výstupního svazku zmenšit. Významnou vlastností polovodičových laserů je možnost jejich přeladování. Úpravou podmínek provozu laseru se přitom docílí emise monochromatického záření s proměnnou vlnovou délkou. [1]

5.2. Plynové lasery

S velikou rozmanitostí se setkáváme u laserů, jejichž aktivní prostředí je tvořeno plynem nebo směsí plynů. Laserová akce je zde určována vlastnostmi plyných soustav, a proto je zapotřebí se o těchto vlastnostech zmínit. Plynové lasery se ukázaly jako velmi perspektivní a mohutné zdroje infračerveného i ultrafialového záření a našly významné uplatnění v technologii. Je to dáno tím, že objem plynu je možno podle potřeby zvětšovat. Plynulým přítokem je možné dodávat stále nové aktivní prostředí.

Inverze populace je vytvářena mezi energetickými hladinami některých složek plynu. Nejvýznamnějšími představiteli plynových laserů jsou atomární He-Ne laser a molekulární CO₂. Existuje mnoho typů plynových laserů a vlnové délky jejich záření pokrývají širokou spektrální oblast od ultrafialového do infračerveného. Výčet nejvýznamnějších plynových laserů je uveden v příloze 1. Většina těchto laserů pracuje v kontinuálním režimu, ale byly vyvinuty i lasery, které v impulsním provozu vyzařují vysoké výkony. Ze specifických zvláštností plyného prostředí vyplývá řada vlastností společných všem plynovým laserům. [3]

Charakteristika aktivního prostředí

Plynný stav je možno charakterizovat jako soubor částic s kvantovými energetickými hladinami s malou vzájemnou interakcí. Částice jsou v neustálém pohybu. To se projevuje na povaze emisních a absorpčních čar. Sledujeme-li emisi a absorpci izolovaných částic, zjistíme, že šířka emisních nebo absorpčních čar je velmi malá.

Označujeme ji jako přirozenou šířku čáry a její tvar popisuje Lorenzova funkce. Teoreticky by šířka čáry odpovídající přechodu mezi dvěma energetickými hladinami měla být nekonečně malá. K jejímu základnímu rozšíření dochází v důsledku toho, že vyzařování je přetržitý děj. Pokud by ovšem vyzařování trvalo nekonečně dlouho, měla by čára „nulovou“ šířku. Doba vyzařování fotonu je však velmi krátká, tím vzniká neurčitost ve frekvenci záření a čára se rozostří. Šířku čáry převážně určují vnitřní síly v částici. [3]

Budeme-li měřit šířku spektrální čáry v plynu, zjistíme, že o několik řádů převyšuje šířku přirozenou. Rozšíření v tomto případě souvisí s translačním pohybem částic v plynu. U pohybujících se částic dochází ke změně emisní frekvence v důsledku Dopplerova jevu. Zdroj vysílající vlnění o určité frekvenci ν_0 a přibližující se konstantní rychlostí se jeví jako zdroj s vyšší frekvencí, vzdalující se od pozorovatele jako zdroj s nižší frekvencí. Rozhodující je vzájemná rychlost zdroje a pozorovatele. Pro změnu frekvence elektromagnetického vlnění způsobenou Dopplerovým jevem platí :

$$\Delta\nu = \nu \cdot \frac{v_0}{c} \quad (1)$$

Kde ν je frekvence záření, $\Delta\nu$ rozdíl rychlostí zdroje a pozorovatele a c rychlost šíření vlnění. V akustické oblasti je Dopplerův jev běžný a setkáváme se s ním při přibližování a vzdalování zdroje zvuku. Tak např. přibližující se zdroj se projevuje vyššími akustickými frekvencemi než vzdalující se zdroj. Totéž platí pro emitující a absorbující částice. Spektrální čára je rozšířena o frekvenci odpovídající podle vztahu (1) rychlostem částic chaoticky se pohybujících prostorem. [3]

Buzení plynových laserů

Mezi nepoužívanější mechanismy buzení patří buzení doutnavým výbojem, elektronovým svazkem a adiabatickou expanzí. Buzení plynových laserů má na rozdíl od jiných typů řadu variant. Velmi běžné je buzení plynových laserů doutnavým výbojem. Doutnavý výboj lze realizovat v plynu při tlacích řádu kPa, kdy plyn je uzavřen např. ve válcové nádobě na konci opatřené elektrodami. Přiloží-li se na elektrody dostatečně vysoké napětí, dojde k ionizaci v prostoru trubice a vytvoří se sloupec ionizovaného plynu. Doutnavý výboj se skládá z několika vrstev, z nichž má každá výrazně odlišné vlastnosti. Rozdíly mezi vrstvami jsou nejen v hustotě iontů, ale i elektronů a také v typu náboje i spádu elektrického potenciálu. Pro buzení je důležitý tzv. kladný sloupec, to je ta část výboje, jejíž délka se mění s délkou výbojové trubice. V kladném sloupci, který je obvykle nejdelší částí výboje, jsou elektrony a ionty rozloženy téměř homogenně podél osy trubice. Rozložení částic v řezu kolmém na tuto osu lze přibližně

modelovat Besselovou funkcí nultého řádu, ve středu trubice je hustota největší, směrem ke stěnám klesá a na stěnách je nulová. [3]

Pro doutnavý výboj je charakteristické rozdělení elektronů podle energie. Toto rozdělení nemá jednoduchý tvar. Je popisováno jako Maxwelllova-Boltzmannova distribuce.

Plynné aktivní prostředí je také možno budit srážkami s elektrony získanými jiným způsobem, než v prostředí doutnavého výboje. Např. srážkami pocházejícími z urychlovače. Vhodnou volbou energie elektronů, případně za pomoci formovacího elektrického pole, je možno dosáhnout velkých úrovní populace. Toho se často využívá při buzení aktivního plynového prostředí s vysokými tlaky plynů.

Další mechanismus buzení je spojen s relaxací vybuzených molekul při průchodu tryskou. Před vstupem do trysky se plyn ohřívá a obsazení energických hladin molekul plynu před expanzí pak odpovídá Boltzmannově distribuci při dosažené teplotě. Po průchodu ohřátého plynu nadzvukovou rychlostí tryskou, dochází k jeho rychlému ochlazení při expanzi. Na výstupu trysky dochází k „zamrznání“ hladin s pomalejší relaxací a naopak k vyprazdňování nízko položených energetických hladin. Výsledkem je inverzní populace v určitém objemu těsně za tryskou. Plynné aktivní prostředí je také možno budit opticky, podobně jako pevné látky. Účinnost tohoto buzení je však malá vzhledem k úzkým absorpčním čarám rotačně-vibračních přechodů plynových molekul.

Použijeme-li však k buzení záření jiného laseru, může se buzením přes jeden absorpční přechod dosáhnout inverzní populace částic. K tomuto typu buzení se nejčastěji využívá výkonných infračervených laserů. Lasery s tímto typem buzení se označují jako opticky buzené lasery. [3]

5.2.1. Helium-neonový laser

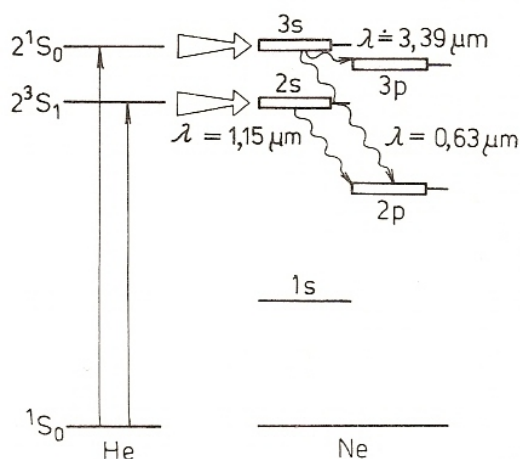
He-Ne laser je prvním plynovým laserem, jenž byl zkonstruován. S objevem tohoto laseru jsou spojována jména A. Javana, W.R. Benneta a D.R. Herriotta. O tomto laseru je známo, že emituje červený paprsek, ale první He-Ne laser generoval záření blízké infračervené oblasti s vlnovou délkou $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$. Záření s touto vlnovou délkou není pouhým okem viditelné. Během prvních dvou let od objevu byla s pomocí He-Ne laseru dosažena generace již na více než čtyřiceti přechodech s vlnovými délkami od $0,63$ do $12 \mu\text{m}$. Při popisu hladin, mezi nimiž dochází k inverzní populaci, je zapotřebí zdůraznit, že všechny se týkají atomů neonu, který je tedy z obou plynných komponent aktivního prostředí He-Ne laseru nositelem zesílení. V současné době mají největší praktický význam tři přechody neonu. První z nich je v červené oblasti viditelného záření $\lambda=0,633 \mu\text{m}$, druhé dva leží v blízké infračervené oblasti $\lambda=1,152 \mu\text{m}$ a $\lambda=3,391 \mu\text{m}$. Poslední jmenovaný přechod je velmi intenzivní a poskytuje velké zesílení. Buzení může probíhat pomocí přímých srážek atomů neonu s elektrony. Mezi silně obsazenými hladinami se tvoří inverze populace.

Největší zesílení je na přechodu $3,391 \mu\text{m}$ a dosahuje hodnoty až 40 dB/m . Přechod 633 nm ve viditelném oblasti má zesílení $0,17 \text{ dB/m}$. Tak malé zesílení již vyžaduje při konstrukci vysoce kvalitní optické prvky. Zamezit současné stimulované emisi $3,391 \mu\text{m}$ není snadné, zvláště v případě, kdy je materiálem optických prvků laseru křemen, jenž propouští infračervené záření vlnové délky okolo $3 \mu\text{m}$. Generace laserového záření vlnové délky $3,391 \mu\text{m}$ zmenšuje zesílení pro červenou čáru, protože zmenšuje obsazení společné horní laserové hladiny. Přitom pro generaci záření $3,391 \mu\text{m}$ postačí rezonátor s malým činitelem jakosti, což komplikuje blokování tohoto laserového přechodu.

Inverzní modulaci pro generaci na čáře 633 nm je možno vytvořit ve výbojové trubici. Zde je důležitý poměr tlaků $p_{\text{Ne}}/p_{\text{He}} = 1:6$, celkový tlak směsi 160 až 190 Pa . Proud výboje asi 20 mA záleží na průměru trubice. [3]

Energické hladiny helium – neonového laseru

Helium–neonový laser jehož aktivním prostředím jsou vybuzené atomy neonu, excitované v doutnavém elektrickém výboji ve směsi helia a neonu. Elektrony výboje předávají při nepružných srážkách část své kinetické energie vnitřním stavům atomů a vyvolávají jejich přechod na vyšší energetické hladiny. Populace hladin atomů je určována nejen buzením, ale i současně probíhající relaxací. Díky dlouhé době života metastabilních stavů 2^1S_0 nebo 2^3S_1 atomů Helia může být jejich populace velká. Helium vzbuzené do těchto stavů slouží jako zásobárna excitační energie. Při srážkách Helia s Neonem dochází k rezonančnímu přenosu excitace od metastabilních stavů 2^1S_0 nebo 2^3S_1 ke stavům $3s$ nebo $2s$, které mají srovnatelné excitační energie. Mezi dvojicemi hladin $2s - 2p$, $3s - 3p$, $3s - 2p$ se poměrně snadno vytváří inverze populace také proto, že stavy „s“ mají delší dobu života než stavy „p“. První helium–neonový laser byl uveden v činnost na přechodu $2s - 2p$ a vyzařoval infračervené záření o vlnové délce $1,15 \mu\text{m}$. [2]



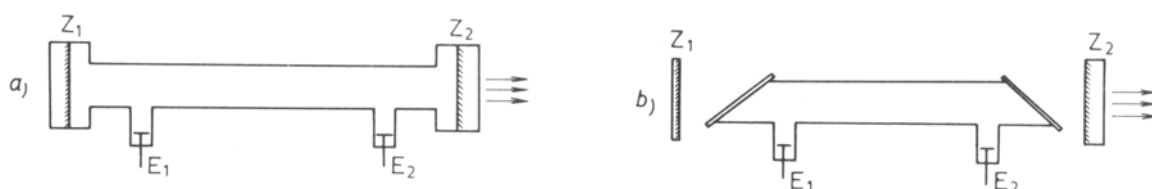
Obr. 11. Nejnížší energetické hladiny helia a neonu. Šipky vzhůru - buzení hélia v nepružných srážkách s elektrony, vodorovné šipky – rezonanční přenos energie, vlnovky – laserové přechody

Varianty optického rezonátoru u Helium – neonového laseru

Z konstrukčního hlediska se ustálily dvě varianty optického rezonátoru. Vnitřní optický rezonátor a vnější optický rezonátor. V hlavici s vnitřním optickým rezonátorem jsou zrcadla umístěna uvnitř výbojové trubice. Toto řešení se vyznačuje malými ztrátami, což se odráží v malém prahovém budícím výkonu. Nevýhodou vnitřního rezonátoru je však postupné rozrušování povrchu zrcadel produkty výboje.

V hlavici s vnějším optickým rezonátorem jsou zrcadla oddělena od výbojového prostoru. Tím že zrcadla nejsou umístěna uvnitř trubice, nemůže docházet k jejich znehodnocení výbojem. Trubice bývá ukončena okénky, skloněnými pod úhlem rovnající se Brewsterovu úhlu, takže výstupní svazek je lineárně polarizovaný. Optický rezonátor má větší ztráty a prahový budící výkon je větší než u řešení s vnitřním rezonátorem

He-Ne laser je zřejmě nejběžnějším laserem vůbec. Velké množství He-Ne laserů je konstruováno pro generaci záření na laserovém přechodu vlnové délky 633nm. Tyto lasery jsou vyráběny v mnoha variantách od přístrojů dlouhých jen několik centimetrů s výkonem 10 až 100 μ W až po dvoumetrové lasery poskytující na výstupu výkon až 100mW. [2]



Obr. 12. Hlavice He-Ne laseru a) s vnitřními zrcadly b) s vnějšími zrcadly a Brewsterovým zakončením výbojové trubice: Z_1 – vysoce odrazivé zrcadlo, Z_2 – polopropustné zrcadlo, E_1 , E_2 – elektrody pro zapálení výboje

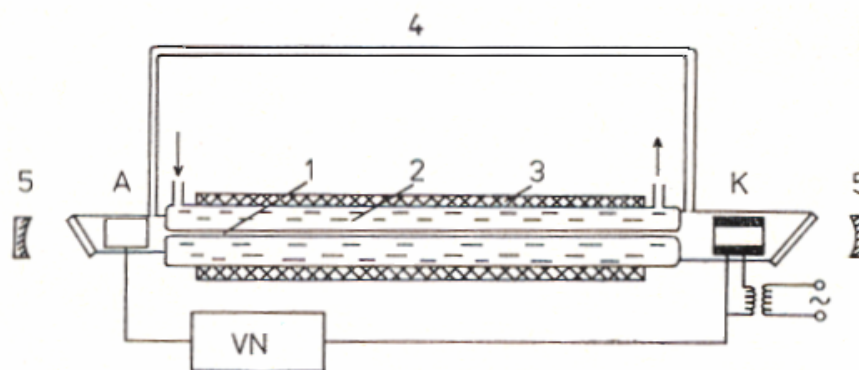
5.2.2. Iontové lasery

Lasery užívající iontů vzácných plynů jako aktivního prostředí představují nejintenzivnější koherentní zdroje ve viditelné oblasti. Excitace iontu lze dosáhnout v intenzivním elektrickém výboji při nízkém tlaku plynu. Vzhledem k tomu, že mechanismus excitace je dvojstupňový, tzn. při první srážce atomu s elektronem ve výboji dojde k ionizaci, při následné srážce k excitaci. Tím je dána malá účinnost iontových laserů $\eta=10^{-3}$. Konstrukce iontových laserů je vzhledem k velkým proudovým hustotám ve výboji mnohem složitější, než konstrukce jiných plynových laserů. Obrovské tepelné namáhání musí také vydržet výbojová trubice, neboť prakticky všechna energie čerpacího zdroje se musí rozptýlit ve výboji. Křemenné trubice za takových podmínek nejsou vhodné. Deformují se nebo na jejich stěnách vznikají vlivem nečistot horké body. Lepším materiálem pro konstrukci výbojové trubice je velmi čistý uhlík, který se však po čase, v důsledku iontového bombardování, mírně rozprašuje. Prach unášený výbojem se zachytí na povrchu trubice a zhorší, nebo znemožní činnost laseru. Tím je určena i životnost laseru, která je poměrně malá, menší než 1000 hod. Nejlépe se osvědčila pro konstrukci výbojové trubice beryliová keramika, která má výbornou tepelnou vodivost. Má také velmi dobrou odolnost proti tepelným a elektrickým šokům, stejně jako proti iontovému bombardování. Její nevýhoda je v tom, že trubici je nutno skládat z asi 10 cm úseků a prach, který vzniká při jejím opracování, je jedovatý pro člověka. Trubice konstruované touto technologií dovolují kontinuálně generovat výkon asi 30 W. Výjimečně se užívá tzv. tandemového uspořádání, kdy jsou za sebou dvě trubice. U tohoto zapojení se dosahuje výkonů kolem 50 W. Pro některé důležité technologické aplikace např. laserovou separací izotopů se používají výkonnější iontové lasery. [1]

5.2.3. Argonový iontový laser

Jedná se o nejvýkonnější laser generující záření ve viditelné oblasti spektra. Historie objevu generace iontového laseru je poměrně dramatická. Prioritu drží Francouzi D. Convert, M. Armand a P.Martinod-Lugard, kteří publikovali svůj objev, modrý laserový přechod ve směsi He-Ar, několik dní před W.B.Bridgesem, jenž studoval výboj v čistém argonu. Obě práce pocházejí z roku 1964, stejně jako další práce W.R.Benneta a J.W.Kundsona, kteří se zabývali zesílením na laserových přechodech argonu a studovali generaci v impulsním režimu.

Jednou z podmínek vytvoření inverzní populace v argonu je velká hustota počtu budících elektronů. Pro excitaci horní laserové hladiny v ionizovaném argonu je potřeba energie 21 až 23 eV. To jest příliš velká energie pro jednotlivé elektrony ve výboji. Proto byl navržen mechanismus excitace, využívající několikastupňové kaskádní buzení. To je důvod, proč se pro buzení Argonového-laseru používá výboj s velkou hustotou počtu elektronů, aby se dosáhlo velké četnosti srážek s elektrony pro účinné kaskádní buzení. Výboj v trubici Ar^+ -laseru již není doutnavý jako u Helium-Neonového laseru, ale hustota počtu elektronů jej řadí mezi doutnavý obloukový výboj. Při doutnavém výboji protéká výbojovou trubicí proud zhruba desítek miliampérů, naopak pro buzení argonového-laseru je zapotřebí proudu desítek až stovek ampérů. Velké hustoty počtu elektronů se dosahuje při buzení argonu v kapiláře, často umístěvané do magnetického pole solenoidu, které udržuje elektrony a ionty u osy kapiláry. Inverzní populace se tvoří díky rychlé nezářivé relaxaci z nižších energetických hladin. Přechodů, na nichž lze generovat záření především v impulsním režimu, je celkem asi 45 a jejich vlnové délky leží v oblasti 260 až 1000 nm. [3]

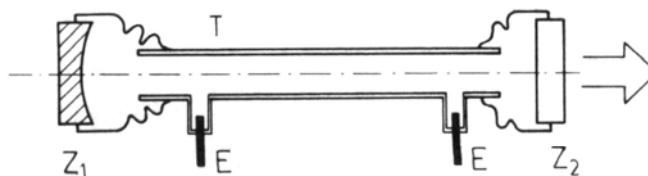


Obr.13. Zjednodušené konstrukční schéma argonového laseru:
1 - vysokoproudová kapilára, 2 - vodní chlazení, 3 - solenoid, 4 - vyrovnávací kapilára, 5 - zrcadla, A - anoda, K - žhavená katoda, VN - vysoké napětí

Na obr. 13. je schéma kapilárního laseru v solenoidu, jehož axiální magnetické pole drží elektrony a ionty na spirálních drahách u osy kapiláry. Konce kapiláry jsou rozšířeny na elektrodové sekce. Je nutné, aby katoda dosahovala velké plošné hustoty emise elektronů a byla do kapiláry schopna dodat proud desítek až stovek ampérů. Anoda, která je zhotovena z molybdenu či nerezavějící oceli i těleso laseru se musí intenzivně chladit. [3]

5.2.4. CO₂ – laser

Jako aktivní částice užívá lineárních molekul CO₂, v nichž dva atomy kyslíku jsou vázány na atom uhlíku a všechny tři leží na stejné rovině. Atomy oxidu mohou vykonávat tři různé kmitavé pohyby. Mohou kmitat souhlasně nebo v protifázi ve směru spojnice či kolmo na ni. Kromě těchto kmitů jsou možné kmity na vyšších harmonických. Při velkých odchylkách od rovnovážných poloh jsou kmity nelineární. Důsledkem těchto možných kombinací je bohaté spektrum vyzařovaných frekvencí molekuly v oblasti vlnových délek 4-18 μm. Celkem je zaznamenáno 574 emisních čar. Nejintenzivnější čáry jsou soustředěny v oblasti vlnových délek 9,5 μm a 18 μm, na těchto CO₂ nejčastěji pracuje. [3]



Obr. 14. Schéma CO₂ laseru: T – výbojová trubice, E – elektroda, Z₁ – kovové zrcadlo, Z₂ – polopropustné zrcadlo

V klasické konstrukci (obr.14.) bývá CO₂ laser tvořen výbojkovou trubicí T s vnitřním průměrem několika centimetrů naplněnou směsí CO₂, dále zrcadly Z₁ a Z₂. Podélný doutnavý výboj v trubici se udržuje vysokonapěťovým zdrojem s proudovým omezením, který je připojen k elektrodám E. Objem doutnavého výboje je současně aktivním objemem laseru. Výstupní svazek vychází polopropustným zrcadlem Z₂. CO₂ lasery vykazují vysokou účinnost a jsou nejrozšířenějšími lasery vůbec. V současné době se vyrábí mnoho variant CO₂ laseru. [2]

Historie CO₂ – laseru

Stimulovaná emise CO₂ molekuly byla poprvé pozorována v r. 1964 fyzikem indického původu C.K.N. Patelem. Laser, který zkonstruoval, měl výkon pouze 1 W. Tento výkon byl postupem doby zvýšen za pomoci směsi N₂:CO₂ na 10 W. Později bylo do směsi přidáno ještě hélium a výkon stoupl na 100 W. Dále se využívala směs, která kromě uvedených složek obsahovala vodík, vodní páru a páry složitých organických sloučenin. Tato směs umožňuje generaci kontinuálního výkonu až 10 KW. [3]

Zvýšení výkonu CO₂ - laseru

Je důležité, že při vývoji tohoto typu laseru byla vypracována i nová technika buzení plynových laserů. V dobré snaze zvyšovat jejich výkon, byl zvyšován i tlak ve výbojové trubici, což je ekvivalentní zvyšování koncentrace aktivních částic. Na tlaku plynu ve výbojové trubici však závisí i charakter elektrického výboje. Při překročení určité hodnoty tlaku se elektrický výboj změní na obloukový.

Tento obloukový výboj hoří v okolí osy trubice a jeho teplota je příliš vysoká. Molekula CO₂ se v něm rozpadá, a tudíž laser přestává fungovat. Proto se zvýšení výkonu CO₂ touto cestou nepodařilo. Protože podmínky generace CO₂ – laseru závisí na složení směsi, přešlo se u výkonnějších typů ke kontinuální výměně náplně výbojové trubice během provozu. U těchto laserů je výbojová trubice na jedné straně čerpaná a z druhé strany se kontinuálně připouští čerstvá směs.

Také zvyšováním průtoku je možno zvýšit výkon laseru více než na dvojnásobek. U laserů s menšími výkony je možno pracovat bez průtoku s trubicí naplněnou směsí plynů a vakuově uzavřenou. Výměna plynů se provádí po stovkách až tisících hodinách provozu.

U výkonových CO₂ laserů se k odstranění molekul z prostoru rezonátoru po vyzáření používá velmi rychlého, podélného nebo příčného průtoku směsi plynu. Budící výboj je u příčného průtoku vytvářen mezi elektrodami rovnoběžnými s optickou osou, opatřenými hroty, aby výboj hořel po celé délce elektrod rovnoměrně. Vzbuzená směs se zavádí do rezonátoru a po vyzáření se z rezonátoru

odstraní. Z laseru s příčným průtokem v trubici dlouhé jeden metr, byl tímto uspořádáním získán kontinuální výkon 1 kW.

Komerčně jsou nabízena zařízení s celkovým výkonem 20 kW. Protože účinnost CO₂ laseru je 10%, činí požadovaný výkon minimálně 150 kW. Nejvyšší publikovaný kontinuální výkon, kolem 400 kW, byl získán v dynamickém plynovém laseru. Při něm se využívá zamrznání vyšších vibračních hladin molekul, při nadzvukové expanzi ohřátého molekulárního plynu do vakua. Plyn s excitovanými molekulami CO₂ zahřátý v obloukovém výboji nebo exotermní reakcí, se nechá expandovat po průchodu tryskou do vakua s rychlostí asi čtyřnásobně převyšující rychlost zvuku ve vzduchu. Za tryskou dochází k rychlému ochlazení, při němž nízko položené hladiny relaxují rychleji než hladiny výše položené. [3]

Jiné modifikace CO₂ - laseru

Zpomalením relaxace „zmrazením“ vyšších vibračních hladin se získá inverzní populace na laserových přechodech v prostoru těsně za ústím trysky. Takto byl získán výkon 135 kW z laseru o délce aktivního prostředí 1 m. Laser se podařilo udržet v chodu jen několik sekund. Průtok plynu při tomto experimentu je ohromující, řádově kg/s a rychle se zaplní vakuový prostor, do něhož plyn expanduje. Jinou modifikací CO₂ laseru, používanou u přístrojů s menším výkonem, je tzv. vlnododový laser. Jeho princip je možno vyložit následovně. Z teorie rezonátoru plyne, že každý mód rezonátoru zaujímá jistý objem, úměrný vlnové délce záření. Jestliže zmenšujeme průřez laserové trubice pod určitou hodnotu, silně rostou difrakční ztráty záření. Pro CO₂ laser to znamená, že trubice s průměrem menším než $4 \cdot 10^{-3}$ m omezuje tvorbu základního modu laseru. To je dáno tím, že vlnová délka záření je poměrně velká.

Výhodou je malý rozměr laseru při relativně velkém výkonu až desítek wattů. Při použití vysokofrekvenčního buzení je možno takový laser napájet z nízkonapětového zdroje. Lasery používané v odtavené verzi dosahují životnosti kolem $36 \cdot 10^5$ s provozu v jedné náplni. [3]

5.2.5. TEA CO₂ – laser

Doutnavý výboj je možno využít k buzení do tlaku plynu zhruba 5 kPa. Zvýšení výkonu laseru z jednotky objemu aktivního prostředí, vyžaduje větší koncentraci excitovaných molekul. V tak hustém výboji se musí doutnavý výboj nahradit impulsním výbojem. Na tomto principu pracuje příčně buzený laser, který se objevil na počátku sedmdesátých let a byl nazván TEA CO₂ – laser¹. Největší potíží při výboji za vyšších tlaků je spojena s dosažením homogenity rozložení náboje v prostoru aktivního prostředí. Zvětší-li se náhodně hustota volných nábojů v některé oblasti prostoru naplněného plynem na atmosférický tlak, dojde k průrazu a většina dodané energie se namísto k excitaci využije k vytvoření průrazové jiskry.

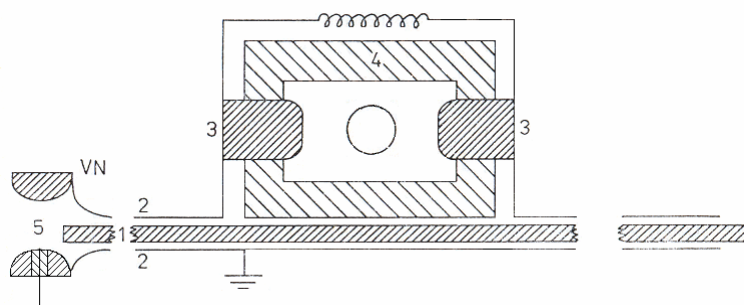
K zajištění homogenního buzení se dá použít úpravy, při níž se jedna z plochých elektrod opatří velkým množstvím drobných jehliček a k excitaci se využije sršení jejich hrotů. Spíše se ale používá modifikace s pevnými elektrodami a předionizačními elektrodami. [3]

¹ Transversal Excitation at Atmospheric Pressure – „příčná excitace při atmosférickém tlaku“

5.2.6. Dusíkový laser

Jedním z plynových laserů buzených výbojem je také laser dusíkový. Byl vyvinut v roce 1964 C. G. Healdem. Jako aktivní prostředí zde slouží molekulární dusík, ale ke samotné generaci postačí i vzduch, který obsahuje kolem 80 % dusíku. Molekula N_2 může být využita ke generaci záření na několika přechodech. Doba života horní hladiny je velmi krátká v porovnání s délkou života hladiny dolní. V důsledku toho nelze použít pomalu se tvořícího doutnavého výboje, doba tvorby výboje totiž překračuje 50 ns. Inverzní populaci mezi hladinami lze vytvořit pomocí impulsního výboje s dobou náběhu kolem 2 ns. Zesílení v dusíkovém laseru je 60 dB/m, což znamená, že záření je na dráze 1 m zesíleno více než 100 000krát. Při tak velkém zesílení již může laser pracovat superradiačně, to znamená, že jediný průchod aktivním prostředím postačí k tomu, aby stimulovaná emise mnohonásobně převýšila spontánní emisi. Superradiační laser tedy nepotřebuje rezonátor vracející emitované fotony nazpět do aktivního prostředí, k dalšímu zesílení.

Inverzní populace se u dusíkového laseru nejčastěji dosahuje příčným výbojem. Zařízení k tomu užívané se sestává z tzv. Blumleinova vedení, vybíjeného na jednom konci jiskřištěm. Vybíjející vlna postupuje nabitým vedením až k tělesu laseru, kde po odrazu od přerušené linky změní polaritu napětí, tudíž se na elektrodách laseru objeví dvojnásobek nabíjecího napětí. Protože rychlost růstu napětí na elektrodách je větší než rychlost rozvinutí výboje, bude výboj rozložen homogenně po celé délce elektrod. Konce výbojové komory jsou opatřeny křemennými okny propouštějícími ultrafialové záření dusíkového laseru s vlnovou délkou 337,1 nm. Někdy se jeden konec komory opatřuje zrcadlem odrážejícím záření zpět do „výstupního“ směru.



Obr.15. Řez dusíkovým laserem buzeným Blumeinovým vedením:
1-dielektrická fólie, 2-měděná fólie, 3-elektrody, 4-kryt výbojové komory, 5-jiskřiště

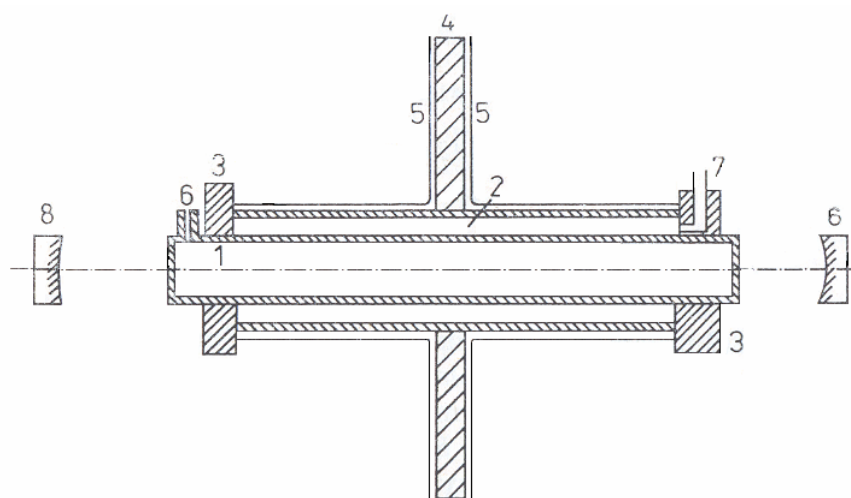
Při délce výboje kolem 300 mm, vzdálenosti elektrod 20 mm, napětí na vedení 20 kV a tlaku 5 kPa lze získat ultrafialový impuls trvající 5 ns s energií přibližně 10mJ. Zvýšení opakovací frekvence impulsu může být dosaženo např. zmenšením průřezu výbojové komory a může dosáhnout hodnoty až několik set hertzů, při středním výkonu několika watt.

Dusíkový laser je jedním z nejjednodušších a nejlevnějších plynových laserů emitujících záření v ultrafialové spektrální oblasti. Je komerčně vyráběn v mnoha modifikacích. [3]

5.3. Ostatní typy laserů

5.3.1. Barvivové lasery

Objev laserového efektu v roztocích barviv spadá do roku 1966, kdy se současně objevily práce P. P. Sorokina a J. P. Lonkarda. Barvivové lasery jsou kvantové generátory, jejichž aktivní prostředí tvoří roztoky organických barviv. Molekuly organických barviv jsou poměrně složité a velký počet jejich vibračních pásů, navíc rozšířených interakcí s molekulami rozpouštědel, vytváří široký fluorescenční pás, posunutý ve srovnání s absorpčním pásem k větším vlnovým délkám.



Obr.15. Uspořádání koaxiálního barvivového laseru: 1- kvyeta s barvivem, 2-výbojka, 3-elektrody výbojky, 4-dielektrikum kondenzátoru, 5-polepy

Existují konstrukční úpravy, při nichž tvoří trubice s aktivním prostředím vnitřek výbojky. V tomto koaxiálním uspořádání lze při dodržení co nejmenší indukčnosti napájecího obvodu, dosáhnout extrémně krátkého budícího impulsu. Tato konstrukční úprava se hodí k buzení většího množství roztoku barviva. Běžné je buzení barvivových laserů druhým laserem. Ačkoliv úhrnná účinnost buzení v systému, sestávajícím se ze dvou laserů, bývá dosti malá, dosahuje účinnosti buzení vlastního barvivového laseru asi 75%. Výhoda tohoto způsobu buzení je také v tom, že je při něm sníženo nebezpečí rozkladu organických barviv zářením parazitních vlnových délek. K přeladování barvivových laserů se v úzké oblasti křivky zesílení používá selektivní rezonátor opatřený mřížkou, hranolem či Fabryovým - Perotovým rezonátorem s napařenými selektivními vrstvami.

K témuž účelu někdy poslouží i laditelný interferenční filtr s klínovitě napařenými dielektrickými vrstvami, který se obvykle hodí pro širší oblast vlnových délek. [3]

Buzení barvivových laserů

K buzení byly použity i vyšší harmonické frekvence laserů, např. rubínového nebo Nd:YAG. Při buzení výbojkou je vhodné volit koncentraci barviva a rozpouštědla podle tloušťky trubice naplněné roztokem tak, aby celý prostor byl pokud možno homogenně ozářen. Budící energie výbojek bývá mezi 10 J až 1000 J. I přes poměrně malou účinnost barvivových laserů se největší energie dosahuje právě při buzení výbojkami. U barvivových laserů se často využívá uspořádání generátor-zesilovač. Barvivové lasery jsou díky velké šířce absorpčních pásů a velkému zesílení zvláště vhodné pro provoz v režimu synchronizace módů a jeho použitím byly získány extrémně krátké impulsy o délce trvání 10^{-12} s. Jistou nevýhodou je omezená stálost molekul organických barviv při ozařování velmi intenzivními zdroji. Také ohřívání roztoků v průběhu ozařování může vést ke snížení a nakonec i k degradaci inverzní populace v důsledku zvětšení rychlosti nezářivých relaxací. Proto se u výkonových a zvláště kontinuálních barvivových laserů buzených argonovým laserem používá průtok barviva prostorem optického buzení. Roztok barviva je plynule přečerpáván z excitační trubice do rezervoáru a po ochlazení nazpět.

K buzení se používají jak impulsní lasery, tak i kontinuální (výkonové, iontové) lasery. K impulsnímu buzení se používá zdvojené frekvence rubínového laseru ($\lambda = 374$ nm), druhé, třetí a čtvrté harmonické neodymového laseru ($\lambda = 530$ nm, 353 nm, resp. 285 nm) a emisních čar plynových laserů dusíkových ($\lambda = 337$ nm). V důsledku dobré shody budící vlnové délky s maximy širokých absorpčních pásů barviv je buzení velmi účinné. Roztoky barviv se plní do křemenných kyvet, buzení se provádí ozařováním ve směru výstupního svazku nebo kolmo k němu. Kyveta s roztokem se vkládá do rezonátoru, do něhož se zavede fokusovaný svazek budícího záření. Postačí odrazivost stěn kyvety, které v případě, že jsou rovnoběžné, fungují jako zrcadla rezonátoru.

Barvivové lasery lze provozovat i kontinuálně. K buzení se používá výkonový, kontinuálně emitující argonový laser s výkonem alespoň 1 W. Podstatné při tom je, že při kontinuálním buzení dochází k velmi rychlému zvýšení teploty

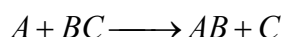
v buzeném prostředí. Barvivo roztoku může proto snadno podlehnout chemickým změnám, uvážíme-li, že do miniaturního budícího prostoru dodáváme energii ohromné hustoty. Jediné řešení tohoto problému je použití průtoku barviva excitační zónou.[3]

5.3.2. Chemické lasery

U chemických laserů k buzení aktivního prostředí přispívá energie uložená v chemické vazbě. U těchto laserů je rozhodujícím budícím mechanismem chemická reakce. Prvý laser na bázi chemické reakce, se objevil v roce 1964 za autorství J. V. V. Kaspera a G. C. Pimentela. Šlo o fotodisociační laser, v němž aktivní prostředí tvořil elektronově excitovaný jod, vznikající rozkladem CF_3I . K disociaci molekuly a excitaci fragmentů rozpadu dochází působením záření s energií fotonů převyšující energii disociované vazby. Myšlenka na konstrukci chemického laseru je však starší a připisuje se J. C. Polanyimu. Koncem šedesátých a začátkem sedmdesátých let vrcholí zájem o chemické lasery. Poté publikační činnost upadá a nové principy se objevují sporadicky, nikoliv pro ztrátu zájmu, ale proto, že se staly předmětem vojensko-strategických projektů a jejich vývoj byl utajen. [3]

Molekulární laser buzený chemickou reakcí

Inverze populace mezi vibračně-rotačními hladinami molekul se vytváří v důsledku nerovnovážného stavu plynu po chemické reakci. Zpravidla po exotermické výměně typu:

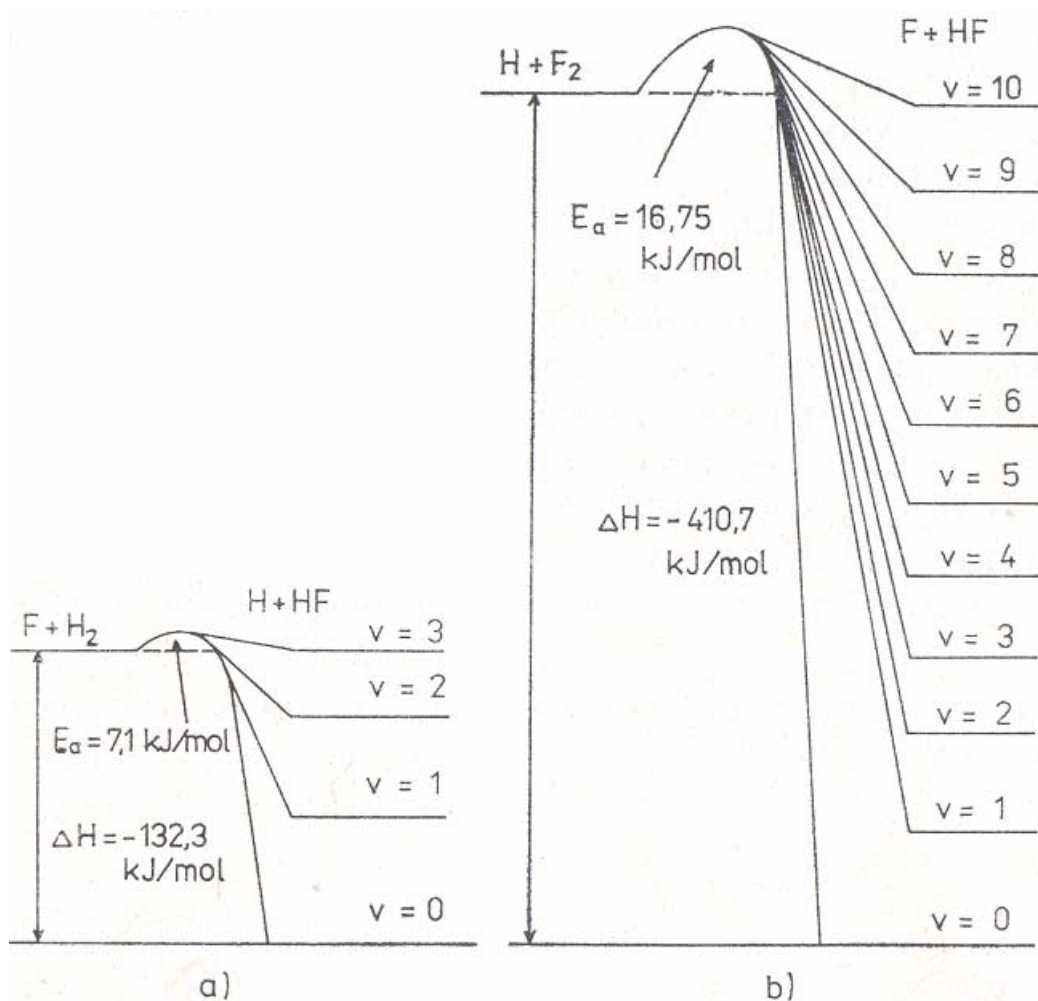


Radikál A, nejčastěji atom halogenu, nahrazuje atom C v molekule BC. Současně se uvolňuje energie. Ta bývá bezprostředně po reakci předána vnitřním stupňům volnosti nové molekuly AB. Někdy dokonce vystupují molekuly AB z reakce s inverzních populacích mezi některými vibračními hladinami.

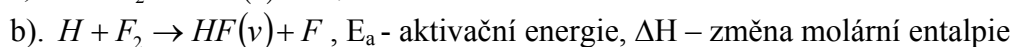
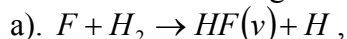
Klasickým chemickým laserem je HF-laser. Jeho aktivní prostředí se vytváří při excitaci směsi molekulárního vodíku s molekulárním fluorem v plynném stavu. V prvním kroku je třeba disociovat buď molekuly H_2 , a nebo F_2 , na radikály H a nebo F, které zahájí řetězové, silně exotermní reakce. [3]



Jakmile se tyto reakce rozběhnou, není systému zapotřebí dodávat další energii. Ta se při reakci sama uvolňuje a důsledkem je vibrační excitace molekul HF (vyznačená značkou (v)). Energetická bilance obou reakcí je rozdílná, v důsledku toho vzniká HF excitovaný v prvním případě reakce (A) do desátého vibračního stavu, ve druhém případě (B) jen do třetího. V aktivním prostředí se tedy budou vyskytovat molekuly HF s kaskádní inverzní populací. Kromě fluorovodíku byla inverzní populace získána u některých jiných halogenovodíků (HCL, HBr) a jejich deuterioderivátů (DF, DCI). Všechny tyto excitované dvouatomové molekuly mohou vytvořit aktivní prostředí na infračervených, rotačně vibračních přechodech.

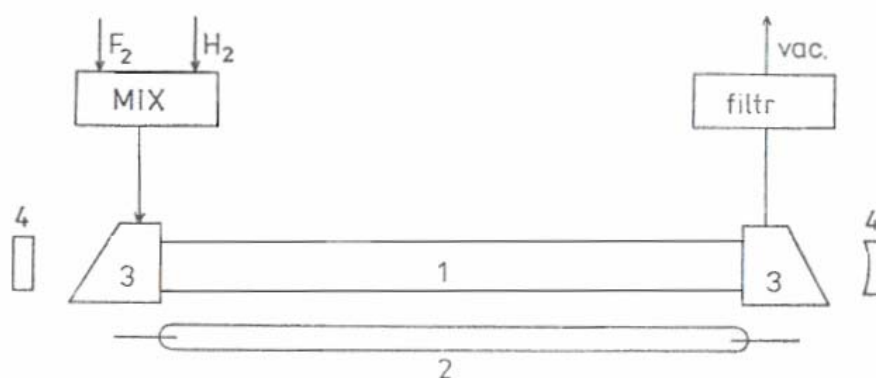


Obr.16. Průběh energetické bariery a excitace vibračních hladin produktů reakcí:



Kromě halogenovodíkových laserů jsou známy lasery využívající energie jiných chemických procesů, např. oxidační reakce. Jedním z nich je i CO_2 – laser, buzený přímo chemickou reakcí. Na principu oxidace probíhají i některé reakce kovů (TiaO_2), při nichž je reakce zahajována explozivním odpařením drátu z příslušného kovu impulsem elektrického proudu v oxidační atmosféře. Podobná technika byla využita i při reakci $\text{Li} + \text{F}_2$.

Chemické reakce, i ty, které byly popsány v souvislosti s chemickými lasery, potřebují iniciaci. Pro impulsní chemické lasery se k inicializaci používá impulsní výbojky jejíž uspořádání je znázorněno na obr. 17. Záření z této výbojky způsobí disociaci reaktantů ve volné radikály, které zahájí řetězovou reakci. Někdy se k iniciaci používá svazek urychleného elektronu.



Obr.17. Schéma chemického impulsního laseru buzeného výbojkou:
 1-reakční kyveta, 2-ionizační výbojka, 3-koncovky s Brewsterovými okénky,
 4-zrcadla, MIX – míchání směsi reaktantů, filtr – odstraňování produktů reakce

Kontinuální provoz chemických laserů využívá příčného toku reagujících složek tryskou. K disociaci lze použít rázovou vlnu, vznikající při supersonickém průtoku, ohřev v obloukovém výboji, explozi v reakčním tanku s následující expanzí produktů reakce. Směšovací komora je umístěna v rezonátoru, mnohdy nestabilního typu, protože zesílení chemických laserů bývá značně velké.

Laser pracující na tomto principu může dosáhnout při délce aktivního prostředí 0,24 m kontinuální výkon přes 15 kW.

Velkou nevýhodou chemických laserů jsou vysoce agresivní reakční složky i produkty reakcí. Při konstrukci chemických laserů je proto také zapotřebí používat chemicky i tepelně odolných materiálů a počítat s ochranou obsluhy před nebezpečnými a jedovatými produkty reakcí. [3]

5.3.3. Lasery s volnými elektrony

U těchto laserů tvoří aktivní prostředí modulovaný svazek elektronů. V jistém smyslu toto zařízení ani nepatří mezi lasery, neboť pojem stimulované emise se stává při popisu jeho funkce nepoužitelný. Autorem myšlenky generace na volných elektronech je J. M. J. Madey se svými spolupracovníky. Elektrony urychlené výkonným urychlovačem na energii 40 MeV, procházejí soustavou supravodivých magnetů, jejichž pole je orientováno kolmo ke směru elektronového svazku a jejichž polarita se střídá. Svazek elektronů se pohybuje po dráze připomínající sinusoidu a přitom generuje záření. Probíhá-li proces v rezonátoru klasického typu, získá se koherentní záření podobné záření emitovanému lasery. Účinnost záření je velká, důležitá je však možnost neobyčejně širokého přeladování vlnových délek. Této laditelnosti lze dosáhnou změnou energie elektronů. I přes vysoké pořizovací a provozní náklady je toto zařízení nezastupitelné ve výzkumných laboratořích. [3]

5.3.4. FIR lasery (lasery vzdálené infračervené oblasti)

Vzdálená infračervená oblast 40 – 1000 μm je nejméně ovládnutou oblastí elektromagnetického spektra. Klasické zdroje mikrovlnného elektromagnetického záření v této oblasti nefungují. Proto úspěchy laserové techniky v infračerveném pásmu vedly k pokusům o využití stimulované emise v této oblasti. Energie kvanta v této oblasti je malá, a tomu odpovídá i malý energický rozdíl mezi hladinami přechodu. Podle Boltzmanova rozdělovacího zákona je obsazení blízkých hladin téměř stejné, proto je obtížné splnit základní podmínky generace laseru. Z toho důvodu je možné v této spektrální oblasti očekávat generaci jen malých výkonů. Prvních úspěchů bylo dosaženo při výbojích v parách H_2O , později D_2O a některých složitějších prostředích. [3]

5.3.5. UV a VUV lasery

Generace stimulovaného záření v této oblasti je značně obtížná. Energie odpovídajícího fotonu je značná, což znamená, že k přechodům musí docházet mezi velmi vzdálenými úrovněmi. Z Boltzmanova rozdělení je známo, že za normálních okolností je obsazení velmi vysoko ležících hladin jakéhokoliv systému velmi malé. Proto dosažení inverze vůči nízko ležícím hladinám je nesmírně obtížné. Tuto obtíž zvyšuje i to, že doba života na vysokých excitovaných hladinách je velmi krátká, což vyžaduje velmi intenzivní čerpání. Proto pokusy generací VUV záření molekuly vodíku nebo jeho izotopů přinesly v oblasti vlnových délek jen skromné výsledky. Bylo sice dosaženo stimulované emise s výkonem 10^4 - 10^6 W, ale jen v ojedinělých impulsech. Nároky na proud elektronů v čerpacím impulsu jsou takové, že při výboji dojde zpravidla k destrukci výbojového kanálku. [3]

6. Využití laseru

Komerční lasery jsou realizovány v mnoha různých úpravách. Běžné jsou lasery s frekvenční stabilizací. Jsou známy i speciální varianty pro výbušná prostředí např. pro doly. Další úpravy vyplývají z potřeb oborů, v nichž jsou používány.

6.1. Technologické využití laseru

6.1.1. Laserové sváření

Aby bylo použití laserového svařování hospodárné je nutná výroba většího počtu kusů. Laserové svařování využívá záření k roztavení materiálu do požadované hloubky s minimálním odpařením povrchu. V praxi se nejvíce používají kontinuálně běžící lasery s vlnovou délkou ležící v infračervené oblasti spektra Nd:YAG lasery (vlnová délka $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) a CO₂ lasery (vlnová délka $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$). Svařování ve srovnání s dalšími aplikacemi vyžaduje menší intenzitu záření optického svazku a větší délku laserového impulsu. Sváření laserovým paprskem má řadu výhod, kterých nelze dosáhnout žádnou jinou technikou.

Vlastní svár je bezporézní a neobsahuje cizí příměsi. Někdy, aby se zabránilo vzniku trhlinek, je při svařování použito přídavného materiálu, který je do paprsku laseru dodáván ve formě drátu. Při svařování se také používá předehřevu jiným paprskem. Jeden paprsek předehřívá materiál v místě budoucího sváru a druhý paprsek provádí vlastní sváření. Díky velkým špičkovým hodnotám energie lze svářet i materiály s vysokým bodem. Laser umožňuje provádět mikrosváry a dají se svářet i materiály dříve nesvařitelné (např. sváření měděného plechu s wolframovým vláknem). V současné době převládá použití Nd:YAG laseru. Laserovým svařováním se např. spojují hermetická pouzdra miniaturních relé, kardiostimulátory, tranzistory, hybridní obvody.

Laserové svařování má oproti jiným metodám řadu předností. Výhodou svařování laserem je absence fyzického kontaktu s elektrodou, lokalizovaný ohřev, rychlé chladnutí a vysoká rychlost svařování. Laserový paprsek může svařovat i na místech těžko dostupných. [2]

6.1.2. Laserové vrtání

Laserové vrtání pracuje na principu odstraňování materiálu odpařováním. Intenzita svazku musí být vyšší než u svařování, a proto se pro tento účel používá impulsních laserů s délkou impulsu menší než 1ms. První laserové vrtání bylo provedeno již v roce 1965, kdy byl rubínový laser použit pro vrtání otvorů v diamantových průvlacích pro tažení drátů. V současnosti se pro laserové vrtání využívají Nd:YAG lasery. Z provedených výzkumů plyne, že kvalitnější díry se získávají při použití krátké doby pulsu. V současné době používané Nd:YAG lasery buzené lampami dávají minimální dobu pulsu 0,1 μ s, nově vyvinuté Nd:YAG lasery buzené diodami pracují s dobou pulsu 10 ns. Samotné zkrácení doby pulsu však nestačí, neboť na stěnách vyvrtané díry se tvoří desetinu mikronu tlustá vrstva odvrtného materiálu. Ke zlepšení odstraňování odtaveného materiálu lze použít vhodné metody vrtání. [2]

6.1.3. Laserové řezání

Laserové řezání se využívá v případě, kdy je nutné oddělit materiál s malou tepelnou vodivostí. Při laserovém řezání je snahou odpařit materiál co nejrychleji při zachování co nejmenší oblasti zasažení tepelnými účinky. Nejpoužívanější lasery v tomto oboru jsou kontinuální CO₂ lasery se středním výkonem do 15 kW. Při požadavku na extrémně úzkou šterbinu řezu je možné vybavit laserové systémy i pevnolátkovými Nd:YAG lasery.

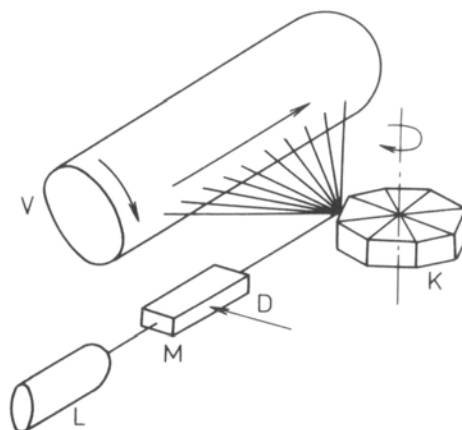
Ve většině průmyslových aplikací využívajících laserové řezání se přivádí koaxiálně s laserovým svazkem na místo řezání proud plynu. Pro řezání kovů se přivádějí reaktivní plyny, jako např. kyslík. Dochází pak k exotermické reakci, která urychluje proces řezání. Tímto způsobem jsou řezány např. titan, oceli s nízkým obsahem uhlíku a nerezové oceli. Pro řezání nekovových materiálů, jako jsou keramika, plasty a dřevo, je na místo řezání přiváděn inertní plyn, sloužící pouze k odstraňování roztaveného a odpařeného materiálu. Tímto způsobem lze řezat rovněž textilní materiály, papír a sklo. Výhodou laserového řezání je velká rychlost, řezání různých tvarů, možnost automatizace, bezkontaktní působení, dobrá kvalita řezu a malá zóna tepelného působení. [2]

6.1.4. Laserové značkování

Laserové značkování je založeno na místním odpaření materiálu na povrchu daného předmětu. Laserový svazek v tomto případě prochází maskou, ve které jsou vyříznuty znaky (písmena, číslice). Při dopadu záření na povrch materiálu vzniká na povrchové vrstvě obrazec daný předlohou. Další možností je pohyb svazku laserového záření po povrchu značkováného materiálu nebo pohyb značkováného předmětu. Znaky sloužící k identifikaci předmětů je možno nanášet na polovodičové, keramické a kovové povrchy, dále na papír, sklo, plasty, feritové elementy atd. Výška znaků je obvykle rovna zlomkům až jednotkám milimetrů, tloušťka odpařené vrstvy materiálu je v řádu mikrometrů. Pro tuto aplikaci se používají výkonové impulsní lasery s energií v impulsu až desítky joulů nebo kontinuální lasery (Nd:YAG laser). Předností laserového značkování je bezkontaktní zhotovování znaků, a tím vyloučení případných deformací a napětí ve značkováném materiálu.

6.2. Laserová tiskárna

Jedná se o zřízení používající laser k vytvoření předlohy obrazce, který má být vytištěn, tj. přenesen z rotujícího válce na papír. Údaje o informaci, která má být vytištěna, jsou včetně zamýšlené grafické úpravy zakódovány v počítači. Odtud jsou přiváděny na akustooptický modulátor, který v souladu s kódováním přerušuje dráhu laserového svazku, dopadajícího na odraznou plošku rozmítacího kotouče. Každá ploška na obvodu kotouče rozmítá svazek po celé délce válce. Válec je pokryt vrstvou fotocitlivého materiálu, který má takovou vlastnost, že po dopadu laserového záření se v ozářeném bodě zmenší elektrický odpor materiálu až o několik řádů. Je-li tato vrstva nabita před záznamem informace na konstantní potenciál, pak se v ní po dopadu laserového záření vytvoří dle kódování obrazec složený z bodů, které mají potenciál odlišný od původního. Na takto vytvořenou předlohu je elektrostaticky nanášeno tónovací médium, jehož přilnavost k válci je dána hodnotou potenciálu v jednotlivých bodových oblastech. Obrazec je z válce přenášen na papír. V laserových tiskárnách se převážně využívá helium-neonového laseru malého výkonu. Výhodou laserové tiskárny je dosažení vysoké kvality tisku při poměrně velké rychlosti. [2]



Obr. 18. Princip laserové tiskárny: L – laser, M – akustooptický modulátor, D – vstup dat, K – rozmítací kotouč, V - rotující válec - šipky označují smysl rotace válce, rozmítacího kotouče a směr rozmítání svazku na válci.

6.3. Medicínské použití laserů

Do medicíny začaly lasery pronikat od konce roku 1961 prvními experimenty v oftalmologii a brzy i v dermatologii. Pevnolátkový rubínový laser byl využit ke koagulacím sítnice a cévním pletení kůže. Mimořádnou zásluhu na zavedení laserů do dermatologické praxe má Leon Goldman, který se zabýval účinky různých laserových systémů na tkáň.

Od začátku 70. let jsou ve světě zkoumány možnosti aplikace nízkovýkonových laserů, zejména při ovlivnění reparačního procesu špatně se hojících ran. [4]

Využití rubínového laseru v medicíně

Rubínový laser byl prvním medicínsky používaným laserem. Selektivní absorpce jeho vlnové délky v melaninu byla v 60. a 70. letech vyzkoušena i v dermatologii, zejména v léčbě pigmentových lézí. Dnes má užití tohoto typu laseru v medicíně pouze historický význam. [4]

Nd: YAG laser v medicíně

Nd: YAG laser je dnes nejvíce používaný typ pevnolátkového laseru. Při kontinuálním režimu je laser buzen opticky hořící kryptonovou výbojkou. Pro impulsní buzení se používá xenonová výbojka, ale do krystalové mřížky se přidávají jako další dopující prvek ionty chromu. Dosahuje energie až 5 při délce pulsu 10^{-4} s s obnovovací frekvencí 100 Hz. Zářív v blízké infračervené oblasti. Pro dermatologii se používají výkony 5-80 W. Jeho záření se v kůži méně rozptyluje a penetruje až do hloubky $3 \cdot 10^{-3}$ m - $5 \cdot 10^{-3}$ m, kde vyvolává koagulační nekrózu². Tohoto efektu je využíváno v léčbě některých vaskulárních névů³, především tuberózních hemangiomů⁴. Novou oblastí tohoto laseru je jinak svízelná léčba keloidů⁵. Pomocí nefokusovaného paprsku lze dosáhnout oploštění a zmenšení projevů. [4]

² Odumření tkáně nebo orgánu

³ Nezhojné kožní pigmentové afekce

⁴ Nádor jednovrstevné výstelky všech cév

⁵ Zvýšené bujení vaziva v jizvě

Helium-neonový laser a jeho využití v medicíně

Tento laser generuje záření které je nedostatečné k tepelným efektům v tkáni, však postačuje k ovlivnění intracelulárních (vnitrobuněčných) procesů. Jeho terapeutické dávky jsou $1-5 \text{ J.cm}^{-2}$.

Nízkoenergetické laserové zařízení je dosud nejvíce využíváno k ovlivnění reparačního procesu špatně se hojících ran. Klinické a experimentální výsledky potvrzují pozitivní ovlivnění syntézou kolagenu⁶, novotvorbu cév a podporu epitelizace⁷. Příznivý vliv na hnisavě povleklé rány je vysvětlován zvýšeným fagocytární⁸ aktivitou leukocytů a stimulací proteolytických⁹ enzymů v ráně, nikoliv baktericidním účinkem záření. Jsou publikovány i účinky analgetické a protizánětlivé, zejména při ovlivnění postherpetických¹⁰ bolestí. Někteří autoři prokázali i lokální imunostimulační¹¹ efekt nízkoenergetického záření, který by v klinice využit při ovlivnění recidiv herpes simplex¹². Experimentálně byl He-Ne laser použit na ložiska lupénky, ty však zůstaly po opakovaném ozáření bez změny.

Vzhledem k dostatečné hloubce penetrace laserového paprsku, je možno záření využít k bezbolestně a sterilně prováděné akupunktuře. Dále tento laser umožňuje vyšetření krevního průtoku v kožních pletencích na principu Dopplerova jevu a prostorové zobrazení kožních a podkožních tumorů pomocí holografie.

Laser dosahuje lepších terapeutických výsledků než ostatní zdroje světelného záření. Jeho uplatnění je všude tam, kde nacházíme potřebu regenerace a hojení. Z těchto důvodů se laser používá téměř v každém oboru lékařství. Při tom se pacient nemusí bát nežádoucích účinků nebo alergie. [4]

⁶ Nerozpustná bílkovina v pohybových tkáních

⁷ Tvoření tkáně složené z několika buněk

⁸ Pohlcování cizorodé částice buňkou

⁹ Štěpení bílkovin

¹⁰ Po infekční onemocnění

¹¹ Nespecifické zvyšování obraných schopností organismu

¹² Opary na rtech

Využití CO₂ laseru v medicíně

Užitím vysokých energií a fokusací paprsku lze získat „laserový skalpel“ k bezdotykovému řezání tkání. Defokusovaným paprskem je možno odpařovat tkáň vrstvu po vrstvě, eventuálně koagulovat (zužovat) cévy do průměru 0,5 mm. Těto schopnosti se využívá u specifických nervů, zejména pro hladká ložiska světlejší barvy, která nereagují příznivě na argonový laser. Podobným způsobem je možno valorizovat rozsáhlé benigní¹³ virové papilomy¹⁴, epidermální névy¹⁵, veruky¹⁶ a projevy nodulární kožní amyloidózy¹⁷. Fokusovaný paprsek je užíván k excizím¹⁸ a incizím tumorů, cyst a abscesů. K největším výhodám těchto operací patří bezkrevnost operačního pole, zmírnění pooperačních bolestí a edémů¹⁹. Předpokládá se zmenšení možnosti rozsevu nádorových buněk.

Kosmeticky výborné výsledky jsou uváděny při evakuaci tenkostěnných i tlustostěnných cyst různého obsahu, při vaporizaci epidermálně i dermálně uložených nádorů, při excizích subdermálně²⁰ uložených nádorů. Tyto výsledky jsou v rozporu s nálezy některých plastických a obličejových chirurgů, kteří udávají spíše pomalejší hojení a širší jizvy po excizích laserem. [4]

¹³ Nezhoubný

¹⁴ Nádor vznikající z tkáň

¹⁵ Nahromaděný pigment v kůži

¹⁶ Výrůstek na kůži s drsným povrchem

¹⁷ Onemocnění charakterizované ukládáním zvláštních bílkovin

¹⁸ Vynětí chorobného ložiska

¹⁹ Otoky

²⁰ Podkožní

7. Rizika spojená s laserovým zářením

Za celou dobu své existence se člověk přesvědčil, že nekoherentní světelné zdroje nepředstavují vážné nebezpečí pro jeho zdraví. Výjimkou tvoří několik případů v extrémních podmínkách. Jsou známy případy oslepnutí v důsledku dlouhodobého pobytu ve vysokohorských zasněžených partiích nebo případy spálenin kůže při slunění na prudkém slunci. Relativní neškodnost světelných zdrojů byla způsobena jejich malou spektrální hustotou záření. Nekoherentní zdroje zpravidla vyzařují ve velmi širokém spektru. Vyzařují do všech směrů a tím mají malou plošnou hustotu záření. Situace se však značně mění pokud se plošná hustota dopadajícího záření podstatně zvětší, např. použitím čočky. Potom i záření nekoherentního zdroje může způsobit závažné poškození.

Velmi nebezpečné je ultrafialové záření, např. slunce, oblouk rtuťové výbojky a speciální zdroje ultrafialového záření, které mohou vyvolat zánět spojivek. Při větších intenzitách a kratších vlnových délkách můžou poškodit oči a vyvolat rakovinu kůže. Navíc ultrafialové zdroje a různé výbojky vytvářejí ve vzduchu ozon, který může při vyšších koncentracích ohrozit zdraví. V některých případech jsou výbojky i obrazovky zdrojem měkkého rentgenového záření.

Důsledek ozařování závisí na těchto faktorech na:

- na vlnové délce dopadajícího záření,
- na energii fotonů,
- na délce doby ozařování.

Práce s lasery má určitá rizika z hlediska působení velkých plošných hustot dopadajícího koherentního záření a krátkých intenzivních světelných pulzů. Určitým nebezpečím je i zdroj vysokého napětí používaný pro napájení plynových laserů. [6]

8. Vliv záření na biologické tkáně

Při hledání přiměřené ochrany zdraví lidí pracujících s lasery je třeba vyjít ze znalostí následků působení záření na biologické tkáně.

Efekty, k nimž může dojít, lze rozdělit na:

- tepelné,
- nárazové,
- elektrické,
- biochemické,
- genetické,

Největší pozornost je nutno věnovat kritickému orgánu, tj. oku, u něhož obnova poškozených partií je velmi obtížná nebo nemožná. Části oka jsou různě citlivé v různých oblastech spektra. Bylo zjištěno, že ionizaci v biologické tkáni nevyvolá záření o vlnové délce větší než 100 nm. Z hlediska bezpečnosti při práci s lasery je tedy třeba věnovat největší pozornost oku, neboť jeho poškození může mít trvalé následky. Například rohovka intenzivně absorbuje ultrafialové a vzdálené infračervené záření, sítnice absorbuje především viditelné a blízké infračervené záření. Při poškození sítnice může dojít ke vzniku další temné skvrny, která i při malém rozměru značně zatěžuje vidění.

Nebezpečnost zdrojů z infračervené oblasti zvyšuje i skutečnost, že na toto záření nereaguje obranný reflex, který při ozáření oka intenzivním světlem způsobí zavření očního víčka a následné zúžení vstupní pupily oka. Nejcitlivější složkou tkání jsou bílkoviny, k jejichž biologickým změnám dochází při teplotě 45 °C při expozici delší než 10^{-5} s. [6]

9. Bezpečnostní předpisy

Současné bezpečnostní předpisy dovolují expozici oka maximálně výkonem 0,4 μW . Pro ozáření pokožky české předpisy přípustnou hodnotu výkonu a energie neurčují. Při práci s lasery existují závazné „Směrnice o hygienických zásadách pro práci s lasery“ uveřejněné v Hygienických předpisech ministerstva zdravotnictví ČR. V uvedené směrnici ministerstva zdravotnictví jsou lasery podle nebezpečnosti rozříděny do čtyř tříd.

Třída I - zahrnuje lasery generující svazek o výkonu menším než 0,4 μW . Takový výkon i při přímém dopadu do oka nepoškodí sítnici.

Třída II – zahrnuje lasery emitující záření ve spojitém režimu ve viditelné části spektra, jejichž výkon nepřesahuje 1 mW.

Třída III – zahrnuje lasery generující ve spojitém režimu ve viditelné části spektra svazek o výkonu menším než 5 mW a impulsní lasery s výkonem do 0,5 W. Difuzní odraz svazku těchto laserů nezpůsobuje poškození zdraví.

Třída IV – zahrnuje lasery, jejichž parametry překračují hodnoty třídy III a také difuzní obraz svazku laserů této třídy může poškodit zdraví.

Každý používaný laser musí být na viditelném místě opatřen štítkem s vyznačením třídy daného laseru a s upozorněním na nebezpečí poškození zdraví. Laser nebo jeho zdrojová část mají mít i světelný indikátor zapnutí laseru. Také prostor v němž se s laserem pracuje má být označen předepsaným znakem. Laser smějí obsluhovat jen určené proškolené osoby. Při používání výkonnějších laserů musí obsluha používat speciální brýle nebo štítky a dráha svazku musí být zakončena terčem schopným absorbovat veškerou energii svazku. Pro lasery IV. třídy jsou vyžadována další zvláštní opatření. Laserový paprsek by se neměl šířit v zóně výšky očí sedících a stojících osob. Dále se v pracovním prostoru nesmí ponechávat předměty, na nichž by mohlo dojít k nekontrolovatelným odrazům. [6]

10. Multimediální studijní materiál

Tato prezentace by měla sloužit k hlubšímu poznání principu laseru a jeho dalšího využití. WWW stránky jsou velmi dobrým multimediálním sdělovacím prostředkem, který může oslovit v podstatě každého jedince. Dnes již má každý možnost zasednout za PC, které je připojeno na internetovou síť a vyhledat si informace, které jej zajímají. Proto jsem velmi rád, že mojí Bakalářskou práci mohu prezentovat na internetu.

Stránky jsou psány s ohledem na kompatibilitu s většinou prohlížečů, proto používám základní XHTML kódování a CCS styly. XHTML kódování má pevnou strukturu a je velmi přísně standardizované oproti HTML, proto v budoucnosti začnou prohlížeče podporovat pouze XHTML. Formátování zajišťují CCS styly, které jsou definované v souboru „styl.ccs“. Zde najdeme přehledně definované formátování a parametry jednotlivých textů, nadpisů, menu atd..

Při promýšlení grafické úpravy jsem samozřejmě přihlédl i k různě používaným rozlišením u monitorů, které se většinou pohybují od rozlišení 800x600 px až po rozlišení 1280 x 1024 px, proto je použité jednoduché menu situované na pravou stranu a horní částí stránky dominuje upravená bezpečnostní tabulka se základními údaji. Barevné rozložení je nenápadné a příjemné napohled. Prezentace kopíruje papírovou podobu bakalářské práce.

Na tvorbu této www práce jsem ze začátku používal program Netepad. Jedná se o poznámkový bok, který je základní výbavou operačního systému Windows. Bohužel tento program nezvýrazňuje CCS příkazy, proto je orientace ve zdrojovém kódu nepřehledná. Později jsem začal používat Golden HTML editor, ve které jsem postrádal parametr Replace, který usnadní vyhledávání a následné přepsání (Replace All) CSS příkazů. Následně mi byl doporučen program Notepad++, jenž je nástavbou klasického poznámkového bloku. Obsahuje však velké množství užitečných příkazů. Což velmi usnadní práci na kódu. Rovněž přehlednost v tomto softwaru je na vysoké úrovni.

Provázanost webových stránek jsem zajistil pomocí příkazu `aktivovaný_text`. Tento příkaz jednoduše určuje odkaz, který má být zobrazen. Nevíce jsem odkazoval na stimulovanou emisi a jednotlivé typy laserových zařízení. Na zvýraznění textu tučně jsem použil známí příkaz `text_tučně`.

Každou kapitolu, která obsahuje více nadpisů, jsem opatřil „klikatelným“ podnadpisem. K tomu jsem použil příkaz `podnadpis
`, který zajišťuje větší přehlednost a urychluje se orientace na stránce.

Multimediální studijní materiál

LASERY a jejich využití

Plynové lasery

- Charakteristika aktivního prostředí
- Buzení plynových laserů
- Helium - neonový laser
- Energické hladiny
- Varianty optického rezonátoru
- Iontové lasery
- Argonový iontový laser
- CO₂ – laser
- TEA CO₂ – laser
- Dusíkový laser

5. Plynové lasery

S velkou rozmanitostí se setkáváme u laserů, jejichž aktivní prostředí je tvořeno plynem nebo směsí plynů. Laserová akce je zde určována vlastnostmi plyných soustav, a proto je zapotřebí se o těchto vlastnostech zmínit. Plynové lasery se ukázaly jako velmi perspektivní a mohutné **zdroje infračerveného i ultrafialového záření** a našly významné uplatnění v technologii. Je to dáno tím, že objem plynu je možno podle potřeby zvětšovat. **Plynulým přítokem je možné dodávat stále nové aktivní prostředí.** Inverze populace je vytvářena mezi energetickými hladinami některých složek plynu. Nejvýznamnějšími představiteli plynových laserů jsou atomární He-Ne laser a molekulární CO₂. Existuje mnoho typů plynových laserů a vlnové délky jejich záření pokrývají širokou spektrální oblast od ultrafialového do infračerveného. Většina těchto laserů **pracuje v kontinuálním režimu**, ale byly vyvinuty i lasery, které v impulsním provozu vyzařují vysoké výkony. Ze specifických zvláštností plyného prostředí vyplývá řada vlastností společných všem plynovým laserům.

[Zpět](#)

Úvod

1. Optické kvantové generátory
2. Základní vlastnosti laser. prostředí
3. Masery
4. Pevnolátkové lasery
5. Plynové lasery
6. Polovodičové lasery
7. Ostatní lasery
8. Průmyslová aplikace
9. Medicínská aplikace
10. Rizika spojená s laserovým zářením
11. Vliv záření na biologické tkáně
12. Bezpečnostní předpisy
13. Důležité objevy v laserové technice
14. Odkazy
15. Bakalářská práce v pdf

Obr. 18. Náhled na webovou prezentaci

11. Závěr

V dnešní době je laserový paprsek využíván ve nepřeborném množství lidských činností. Objev laseru nebyl jednoduchým a na jeho zdokonalení se podílelo velké množství vědeckých nadšenců. Je zcela jisté, že vývoj tohoto převratného zařízení bude pokračovat i nadále.

Při psaní své práce jsem narazil na velké množství materiálů, které se týkají laserů, jejichž princip byl příliš komplikovaně popsán. Z toho důvodu jsem zvažoval použití těchto materiálů, které se mi nezdály příliš vhodnými. Nejvíce jsem čerpal z knižních publikací M. Vrbové, P. Engsta a P. Horáka, jenž jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

Řešil jsem také, zda zařadit polovodičový laser samostatně, protože jeho význam pro vědu je značný. Usoudil jsem, že jej zařadím mezi pevnolátkové lasery.

V této práci jsem se samozřejmě mohl zaměřit na vícero aplikací, které se dotýkají této problematiky. Myslím tím ku příkladu čárové lasery, které jsou také dosti významnými, obzvláště pro zpracovávání informací při zadávání dat. Dále laserová ukazovátka, která mi připadla k tématu spíše doplňující. Při zpracovávání multimediálního studijního materiálu jsem se rovněž zdokonalil ve vytváření webových stránek.

Touto prací jsem chtěl popsat základní lasery a principy, na nichž pracují. Na tomto místě bych rád poděkoval panu PaedDr. Jiřímu Tesařovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky.

12. Seznam použitých zdrojů

- [1] Sochor, V. Lasery a koherentní svazky. Praha: Academia, 1990.
- [2] Vrbová, M. a kol. Lasery a moderní optika. Praha: Prométheus, 1994.
- [3] Engst, P., Horák, M. Aplikace laserů. Praha: SNTL, 1989.
- [4] Kolářová, H., Ditrichová, D. Laserové záření v medicíně. Olomouc, 1996.
- [5] Mařátko, J. Elektronika – Lasery. Praha, 1998.
- [6] Ministerstvo zdravotnictví ČSR. Hygienické předpisy. Praha: Avicenum, 1982.
- [7] Strumban, E., J. Lasery a optoelektronika. Praha: Panorama 1989.
- [8] Kašpar, M. Lasery ve stavebnictví a navigace strojů. Praha: ČKAIT, 2001.
- [9] Chmela, P. Lasery a jejich fyzikální aplikace. Olomouc, 1972.
- [10] Kupka, Z. Pokusy s laserem. Praha: Prométheus, 1996.

[1] <http://www.fzu.cz/departments/xraylaser/dxc102xl.html>

[2] <http://www.lao.cz/common/home.php>

[3] <http://www.cez.cz/presentation/static/lasery/laser.htm>.

[4] <http://www.fi.muni.cz/~xpavlov/xml/examples/bc1/bc1.pdf>

[5] <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/lasery/node5.html>

[6] <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/node92.html>

[7] <http://www.medicom.cz/p.php?p=prumyslove>

[8] http://www.bla.cz/_new/_optic/_laspolo/index.html

[9] <http://www.klinikazlin.cz/laser.html>

[10] <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>

[11] <http://www.jakpsatweb.cz/>

[12] <http://www.webtvorba.cz/>

[13] <http://www.jaknaweb.com/clanky/tvorba-www>