

## PRINCIP LASERU

Zkratka LASER je složeninou ze začátečních písmen anglických slov popisujících jeho funkci: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation což by se dalo naší řečí říci, jako: Světlo zesílené stimulovanou (vynucenou) emisí záření. Někdy se také po česku říká LASERu kvantový generátor světla, ale tento výraz je užívám především mezi vědci. Z názvu je zřejmé, že laser vydává světlo. Prvním kdo popsal a vyrobil první funkční LASER, byl vědec Theodore Maiman a vše se to odehrálo v létě roku 1960, což tedy předurčuje zařadit LASER do vynálezů dvacátého století.

LASER má několik velmi významných vlastností, pro které je velmi hojně využíván. Tou nejhlavnější je koherentnost (uspořádanost) paprsku, který dokáže produkovat. To znamená, že světlo které vydává, není jako třeba ze žárovky, které se šíří všemi směry, a obsahuje velmi široké spektrum barev, ale LASERové světlo se šíří jen v úzkém paprsku, a je také monochromatické (jednobarevné) - obsahuje jen jednu barvu podle použitého druhu aktivního prostředí, ve kterém LASERový paprsek vzniká a má malou divergenci (rozbíhavost). Rozdíl je názorně vidět na příkladu: pokud "posvítíme" laserem na měsíc, bude mít osvětlená plocha průměr několik kilometrů. Zdá se vám to hodně? Tak zkuste svítit žárovkou na měsíc.

Kvůli těmto a dalším vlastnostem je LASER hojně využíván především pro veškeré měřičské práce na delší vzdálenosti, kde je potřeba docílit velmi dobrých výsledků (měření vzdáleností a určování směru - například při stavbě Metra). To je zabezpečeno tím, že rozptyl paprsku LASERU je mnohonásobně menší než třeba rozptyl světla oné žárovky. LASER má ale i jiná prvenství, jedno z nich je třeba to, že LASERy jsou nejjasnějšími emitory světelného záření. Ale nebo se dá říci i nejosvětlejší. Můžeme s ním opracovávat i velice tvrdé materiály. Lze s ním svařovat i materiály dříve nesvařovatelné. Proto se dnes LASERy dají využívat třeba jako řezačky ocelových plátů, i několik desítek centimetrů silných. Jejich výkon je ovšem zas závislý na použité technologii, nemůžeme očekávat, že třeba rubínový LASER nám dodá výkon několik kW. Ale to vysvětlím později. V ruce lékaře se stává naprosto sterilním a bezbolestným skalpelem. Nebo nám například doma přehrává kompaktní disky. Dokáže přenášet obrovské množství informací na velké vzdálenosti. Jen málokterý nástroj, který má člověk k dispozici je tak všestranně použitelný jako laser.

Z definice vyplývá, že laser je zařízení, které přeměňuje dodávanou energii na laserové světlo. energii můžeme dodávat různým způsobem, například opticky (světlem výbojky), chemicky, elektricky atd. Vzhled samotných laserů je velmi různorodý. Záleží hlavně na druhu laseru, na jeho konstrukci a v neposlední řadě na jeho použití.

LASER je tedy světelné záření o velmi vysoké intenzitě, koherentnosti a určité vlnové délce. Proto se na něj vztahují veškeré zákonitosti o šíření elektromagnetických polí, tuto teorii předložil fyzik a vědec James Clerk Maxwell. LASERové záření má několik barev a několik vlnových délek, ty záleží především na použité technologii, kterou můžeme dělit na dvě hlavní podskupiny. Tou první jsou Pevnolátkové LASERy, a tou druhou Plynové LASERy. Jejich hlavní rozdíl je v použitém aktivním prostředí, v tomto prostředí vznikají LASERová záření vzájemným srážením atomů, a předáváním své energie, což způsobuje excitaci atomů do vyšších vrstev. Když pak se takovýto atom vrací na svojí hladinu, vyzařuje záření ( fotony ) které nazýváme LASERové záření, toto záření pak má určitou vlnovou délku, která se dá vypočítat ze vzdáleností energetických hladin atomů. Zde začínají platit pravidla Kvantové mechaniky. A to v zásadě pravidlo tak zvané vynucené emise ! Toto pravidlo praví, že pokud na atom který se nachází na vyšší energetické hladině a odmítá ji opustit, dopadá kvantum další energie, může být přinucen tento stav opustit. Při čemž původní kvantum se nepohltí, ale výsledkem jsou dvě kvanta světelné energie ( Světlo o dvojnásobné energii ) - toto je také hlavní princip LASERŮ ! Znamená to, že jedním fotonem nabouráme do atomu, a vzniknou nám tím dva fotony !

Princip LASERu na atomární úrovni je nám již znám, teď zbývá už jen vysvětlit co všechno to vlastně potřebujeme k jeho vytvoření. Tak tedy první věcí co LASER potřebuje, je tak zvané Aktivní prostředí - Aktivním prostředím se myslí látka ať již plynná, pevná, či kapalná, která je nasycena více atomy na vyšších energetických hladinách. Tyto atomy pak mohou emitovat dvojnásobnou světelnou energii ( nazýváme to Luminiscencí ).

Rezonanční obvod - tento obvod nám zaručí, že světlo vydrží určitou dobu v aktivním prostředí, tedy tak dlouho, aby paprsek dokázal nabrat co nejvíce energie vynucených emisí, tvoří tedy zpětnou vazbu !

Brewsterův úhel - Je to úhel dopadu svazku paprsků optických zařízení 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. Odrazu od rozhraní se užívá pro přípravu lineárně polarizovaného záření.

## Kvantová hypotéza

14. prosince 1900 vyslovil tehdy dvačtyřicetiletý Max Planck hypotézu, která umožňovala vypočítat přesně vzorec udávající spektrum záření černého tělesa. Podstata hypotézy byla, že světlo je tvořeno malými částicemi energie nazývanými kvanta. Energie každého kvanta je úměrná kmitočtu daného záření. Toho dne vznikla kvantová fyzika, která zahájila novou éru. Podle představ kvantové fyziky má světlo dvojaký charakter. Světlo je tedy zároveň částicí i vlnou. Spor Newtona a Huygense byl nakonec vyřešen důmyslnou syntézou. Planckova kvanta energie byla později nazvána fotony. Fotony letí prostorem a při srážce s jinou částicí se chovají jako částice. Mezi sebou ale fotony interferují jako vlny. Dopadají-li na dvě štěrbinu, dokážou se zařadit tak, že projdou oběma štěrbinami zároveň a na stínítku vytvoří difrakční obrazec. Kvantová mechanika později ukázala, že tato dvojakost není vlastností pouze fotonů, ale i elektronů a nukleonů a vůbec všech přírodních objektů a že s pohybem mechanickým je spojen i pohyb vlnový.

Planckova kvantová hypotéza sice přivedla fyziky ke správnému vzorci udávající intenzitu jednotlivých částí spektra záření černého tělesa, avšak blíže nepopisovala způsob jeho vzniku. Nevysvětlovala principy vyzařování a pohlcování záření atomy. To se povedlo až dalším rozvojem kvantové teorie na počátku našeho století. Slavný dánský fyzik Niels Bohr vypracoval v letech 1912-1913 planetární model atomu vodíku. Podle něj obíhají elektrony kolem jádra po vymezených drahách podobně jako planety kolem slunce. Přeskočí-li elektron z jedné dráhy na druhou, může atom získat či ztratit energii v podobě elektromagnetického záření. Energie atomu se změní právě o vyzářené nebo pohlcené kvantum. Poloměr dráhy a další parametry elektronu se musí změnit skokem.

Ve dvacátých letech byla zásluhou předních teoretických fyziků, jako byl Louis de Broglie, Max Born, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, P. A. M. Dirac a další, vytvořena matematická teorie kvantové mechaniky, jak ji fyzika používá v dnešní podobě. Je to velmi neobvyklá teorie, protože místo s čísly a funkcemi pracuje se symboly zvanými operátory. Experimenty nicméně dokazují, že pravdivě popisují zákony mikrosvěta. Klasická mechanika stojí na tom, že lze s matematickou přesností určit polohu planet v prostoru v libovolném čase. Při pohybech uvnitř atomů však přestává klasická mechanika platit. Elektron uvnitř atomu se nepohybuje jen jako planeta, ale musí být zároveň vlnou. Nepohybuje se tedy po kruhové dráze, ale koná jakýsi roztodivný tanec kolem jádra, hned je tam a hned zas tady. I přesto je v jeho pohybu jistý řád. Pohltí-li atom světelné kvantum, začne elektron poskakovat ve větší vzdálenosti od jádra.

Způsob jakým se elektron pohybuje pro nás ale není důležitý. Podstatné je, že atom má určitou energii, říkáme, že se nachází na určité energetické hladině. Tato energie je neměnná, dokud atom nepohltní, nebo nevyzáří kvantum elektromagnetického záření. K přeskoku na vyšší energetickou hladinu musí atom pohltit kvantum s určitou energií, tedy určité vlnové délky. Tato vlnová délka se dá vypočítat ze vzdálenosti energetických hladin atomu.

Mezi vyzářením (emisi) a pohlcením (absorpcí) kvanta energie je ale určitý rozdíl. Je zřejmé, že kvantum energie musí být pohlceno ihned po dopadu. Co ale donutí atom na vyšší energetické hladině, aby ji opustil a vyzářil energii? A tu jsme u jádra věci. Atom zůstane na vyšší hladině různou dobu, podle toho jak stabilní bude jeho stav. Pro každou hladinu existuje určitá střední doba života, po níž atom na této hladině setrvává. Existují hladiny o velmi dlouhé době života, kde se atom udržuje třeba i po dobu celé vteřiny. Takovým hladinám říkáme metastabilní. Dříve nebo později však atom vyšší hladinu opustí a vyzáří elektromagnetické kvantum. Učiní tak sám od sebe, spontánně a proto hovoříme o spontánní emisi záření. Kdy se to stane je pro každý jednotlivý atom věcí náhody. Co je pro jeden atom věcí náhody, je pro miliardy atomů železným zákonem. V průměru atomy energii jednak vyzařují a jednak pohlcují za přesně vymezenou dobu.

## Absorpce, samovolná a vynucená emise záření

Tím, že teoreticky předpověděl jev indukované emise, mohl Einstein hlouběji objasnit způsob záření černého tělesa. Stěny tělesa vyzařují díky spontánní emisi. Toto záření se pak od stěn dutiny odráží a může být podle okolností pohlceno, nebo může vyvolat indukovanou emisi. Pravděpodobnost obou výsledků je podle Einsteina stejná. Záleží tedy pouze na tom, zda se foton setká s atomem na spodní hladině, schopným pohltit energii, nebo s atomem vybuzeným (excitovaným) na horní hladině, který může energii vyzářit.

Činnost laseru je založena na principu indukované emise, který Einstein předpověděl již v roce 1916. Jak se tedy mohlo stát, že tento jev byl poprvé využit až ve čpavkovém generátoru v roce 1954 a že první laser zazářil až v roce 1960? Vždyť princip byl znám téměř čtyřicet let, co tedy bránilo jeho praktickému využití? Zahřáté těleso je v rovnováze. Spektrum záření, průměrné koncentrace atomů na různých energetických hladinách, to vše zůstává neměnné, pokud je udržována stálá teplota. V takovém rovnovážném stavu je atomů s menší energií vždy mnohem více, než atomů vybuzených. Dopadající záření je tedy většinou pohlcováno a počet indukovaných emisí je zanedbatelně malý. V záplavě spontánního záření je takovéto vynucené vyzařování nepostřehnutelné. I když vědci uznávali význam Einsteinovy práce, pokládali ji pouze za teoretickou předpověď a vynucenou emisi považovali za jev velmi slabé intenzity, který nemá žádný praktický užitek a nestojí za namáhavé experimentální zjišťování.

Talentovaný anglický fyzik Paul Adrien Maurice Dirac provedl koncem dvacátých let ještě detailnější matematickou analýzu kvantové teorie záření a dále rozvinul Einsteinovy myšlenky. Einstein i Dirac si byli vědomi vlastností, jaké by

vynucené záření mělo. Narozdíl od chaotické spontánní emise bude vyzařování při vynucené emisi mnohem uspořádanější. Dopadající i vyzářené kvantum budou mít totiž stejnou vlnovou délku a stejnou fázi, budou vzájemně koherentní. Světlo vyzářené při indukované emisi nebude pouze zesíleno, zachová si i charakter sinusové vlny, u níž je možno v každém okamžiku a v každém místě určit, zda právě prochází vrchol vlny či jiná její fáze.

Před vynálezem laseru neznala optika zdroje takového koherentního světla. Koherentní světelná vlna má stejné vlastnosti jako radiová vlna, lze ji proto také použít k přenosu zpráv. Je to ale vlna s frekvencí biliónů kmitů za vteřinu. Je-li šířka televizního kanálu kolem 4 megahertz, bylo by možno pouze na viditelných vlnách přenášet vysílání osmdesáti miliónů televizních kanálů zároveň. Koho to ale mělo napadnout v roce 1916, kdy teprve radioamatéři začínali lovit první radiové signály.

Záření vznikající při indukované emisi má pouze jeden přesně stanovený kmitočet, pouze jednu vlnovou délku. Je to dáno tím, že fotony, které na sebe paprsek nabírá vznikají při přeskokách atomů mezi stejně vzdálenými hladinami. Na rozdíl od spontánní emise, kdy je energie nevhodně rozdělena do širokého spektra záření, dává nám indukovaná emise světlo jednobarevné (monochromatické). Jeho kmitočet a vlnová délka budou přitom vysoce stabilní a to nám dává možnost vytvořit vysoce přesné hodiny nebo standard délkové míry. Einstein i Dirac si byli vědomi toho, že vynucené záření nebude vyzařováno všemi směry, nýbrž podle zákona zachování impulsu bude přesně směřováno. Vzniklý paprsek bude tedy velmi úzký a světelná energie bude koncentrována v malé oblasti prostoru. Kromě toho je možné očekávat, že záření proběhne velmi rychle, protože dopadající kvantum záření vyvolá téměř okamžitě vynucenou emisi.

K praktickému využití vynucené emise a tím pádem i ke konstrukci prvního laseru bylo třeba ještě vyřešit dva ryze technické problémy.

1. Vytvořit nerovnovážený stav, kdy bude více atomů na vyšších energetických hladinách než na hladinách nižších. V takovém případě hovoříme o populační inverzi a těleso nazýváme aktivním prostředím.
2. Najít způsob, jak udržet paprsek uvnitř aktivního prostředí dostatečně dlouhou dobu, aby stihl nabrat co nejvíce energie vynucených emisí. Řečeno slovy radiotechnika: vytvořit příslušný rezonanční obvod se zpětnou vazbou.

#### Aktivní prostředí

Abychom mohli zkonstruovat laser, musíme mít nejdřív aktivní prostředí. S různými podobami aktivního prostředí se člověk setkává po celé věky. Zářivý třpyt drahokamů pod dopadajícími slunečními paprsky, lampičky světlušek, světélkování lesních pařezů a bahenních plynů, svítící ornamenty mořských hlavonožců a hlubinných ryb, to vše jsou různé druhy studeného světla vzniklé v energeticky obohaceném prostředí s inverzí populací hladin. Všechny tyto a mnohé další přírodní jevy zahrnujeme pod společným názvem luminiscence. Dlouhodobé světélkování se nazývá fosforescence, zatímco krátkodobé trvající pouze nepatrný zlomek vteřiny se nazývá fluorescence. Nejen zahřátá tělesa mohou svítit, nýbrž i tělesa chladná, mají-li ovšem k dispozici vhodný zdroj energie. Toto studené světlo je dokonce mnohem hospodárnější, protože je zde energie mnohem lépe využita, a tím dává také mnohem více možností k praktickému využití.

Jedním ze základních přírodních zákonů je zákon o zachování a přeměnách energie. Známe mnoho různých druhů energie, které mohou přecházet jedna v druhou tak, že celkové množství energie v každém izolovaném systému zůstává neměnné. Ke vzniku luminiscence je třeba dodat látce energii v libovolné podobě, kromě energie tepelné. Podle druhu energie, která se přeměňuje na studené světlo rozlišujeme několik druhů luminiscence. Pokud dodáváme energii v podobě světelného nebo ultrafialového záření, hovoříme o fotoluminiscenci. Jde-li o energii v podobě elektrického pole nebo proudu, dochází k elektroluminiscenci, svazek elektronů dopadající na obrazovku televizoru vyvolává katodoluminiscenci. Radioaktivní látky vyvolávají radioluminiscenci, ultrazvukem je možno vyvolat sonoluminiscenci, mechanickou deformaci tělesa triboluminiscenci. Konečně světlo tlejících pařezů a světlušek má svůj původ v chemické energii procesů probíhajících v živé hmotě a proto nese název chemiluminiscence a bioluminiscence.

Každý druh energie, který lze použít k vyvolání luminiscence, můžeme použít také při konstrukci laseru. Dnes tedy známe lasery buzené světlem, elektrickým proudem, svazkem elektronů, chemické lasery a další. Každý z uvedených druhů laserů má své přednosti i nevýhody a nachází použití v různých oblastech lidské činnosti. Při přeměně jednoho druhu energie v druhý je také důležitá účinnost této přeměny. V žárovce se mění jen necelá tři procenta elektrické energie ve světlo. U zářivek je to už něco kolem deseti až patnácti procent. Zato světluška dokáže přeměnit svou biochemickou energii na světlo téměř na sto procent. V tomto ohledu překonává příroda vše, co se zatím podařilo člověku dosáhnout.

#### Stimulovaná emise

A tu se dostáváme k Albertu Einsteinovi. V době vzniku kvantové teorie na počátku století byl v úzkých stycích s Maxem Planckem. Byl vlastně jedním z prvních, kdo pochopili její plný dosah a sám přispěl k jejímu dalšímu rozvoji. Einstein podal kvantové vysvětlení fotoelektrického jevu, tepelných vlastností krystalů a konečně publikoval práci zásadního významu, v níž odvodil novým způsobem Planckův zákon záření černého tělesa. V ní ukázal, že neexistují pouze dva procesy při vzájemném působení látky a záření, ale tři. Dopadá-li kvantum energie na atom, který se nachází

na vyšší energetické hladině a odmítá ji prozatím opustit, může k tomu být přinucen. Původní dopadající kvantum se ale nepohltí. Výsledkem jsou tedy dvě kvanta světelné energie, světlo o dvojnásobné energii. Tento jev dostal název vynucená neboli indukovaná emise záření.

Shrňme si nyní všechny tři možné případy. Budeme si přitom představovat atom, který má pouze dvě energetické hladiny (dvouhladinový systém) a může přecházet z jedné hladiny na druhou za současného pohlcení nebo vyzáření kvanta elektromagnetického záření. V prvním případě máme atom na horní energetické hladině. V některém okamžiku, který nelze předem určit, opustí atom horní hladinu a přejde na hladinu spodní. Zároveň vyzáří kvantum energie, hovoříme o spontánní emisi. V dalších dvou případech dopadá na atom kvantum elektromagnetického záření. Zastihne-li ho na spodní energetické hladině, může být atomem pohlceno a atom přeskóčí na horní hladinu, hovoříme o absorpci. Setká-li se záření s atomem na horní hladině, může ho donutit vyzářit další kvantum energie a přejít na spodní hladinu, hovoříme o indukované emisi.

#### Oscilační obvod

Pokud se obvod ponechá sám sobě, jsou kmity tlumeny až se nakonec kmitání v obvodu zastaví. Pokud chceme, aby generátor pracoval nepřetržitě, musíme mu dodávat energii. Tato energie musí ale přicházet v pravý okamžik a k tomu slouží elektronka nebo tranzistor jejichž ovládací prvek je spojen s obvodem zpětnou vazbou. Zpětná vazba je důležitá nejen při řízení činnosti oscilačního obvodu, ale neobejde se bez ní ani činnost lidské společnosti.

#### První LASER

Maimanův laser byl velmi nedokonalý a zdaleka ne tak efektivní, jako dnešní lasery. Jeho rubín měl tvar krychličky o hraně jednoho centimetru a dvě protilehlé stěny byly postříbřeny. Maiman ho pravidelně osvětloval záblesky zeleného světla a srovnával světlo, které vycházelo z okénka v postříbřené straně se světlem ze strany boční. Při dostatečně silném osvětlení se začala zužovat červená spektrální čára a její intenzita začala narůstat. Červené světlo vycházející okénkem začalo být koherentní, monochromatické a směrované. V tomto svém prvním experimentu mohl Maiman pouze sledovat zužování spektrální čáry a narůstání její intenzity, což byl však neklamný příznak toho, že krystal začal "laserovat".

Dokonalejším způsobem byl Maimanův experiment proveden skupinou amerických fyziků R. I. Collinsem, D. F. Nelsonem, A. L. Schawlovem, W. Bondem, G. B. Garettem a W. Kaiserem. Jejich rubín měl již délku čtyř centimetrů a vyzářená energie činila jednu setinu joulu. Laserový puls trval několik desetitisícin vteřiny a výkon tohoto laseru byl tedy kolem 100 wattů. Collins se svými spolupracovníky pozoroval vedle monochromatickosti také prostorové soustředění světla do úzkého kužele s vrcholovým úhlem menším než jeden stupeň. Provedl také difrakční pokus, který prokázal koherenci světelného paprsku.

#### Lasery současnosti

Od spuštění prvního laseru uběhlo čtyřicet let. Během té doby se, zejména v šedesátých letech, začaly objevovat další typy laserů, lišící se aktivním prostředím, nebo konstrukčním uspořádáním. Vznikaly také lasery s dalšími vlnovými délkami v oblasti viditelného, infračerveného, ultrafialového a dokonce i rentgenového záření. Každý z těchto laserů našel uplatnění v jiné oblasti lidské činnosti. Ne každý laser se hodí pro každý účel.

Při sváření a vrtání je určující charakteristikou výkon laseru, proto se zde uplatňují impulsní lasery. Zvyšování výkonu se ale nedělo zvyšováním energie vyzářené laserem. Celková vyzářená energie nemůže být větší než energie přijatá. Výkon laseru ale také závisí na délce laserového pulsu, čím bude puls kratší, tím větší bude výkon. Zkracování délky pulsu vedlo až k několika nanosekundám. Takovým pulsům říkáme gigantické nebo obří a získáváme výkony slušné elektrárny.

Při přenosu informací se naopak používají lasery pracující v nepřetržitém režimu. Atmosféra ale laserový paprsek silně oslabuje, proto je vhodné použít lasery pracující v oblasti takzvaných atmosférických oken, pro která je atmosféra velmi průzračná. Většina laserů pracuje na jedné určité frekvenci, kterou není možné měnit. Pokud chceme používat více frekvencí, použijeme lasery přeladitelné.

Pokud používáme laser k přenosu energie je pro nás nejdůležitější účinnost přeměny energie v laserový paprsek. V tomto ohledu jsou na tom nejlépe lasery polovodičové. Pro lasery pracující ve vesmíru potřebujeme nezávislý zdroj energie. Neexistuje univerzální laser, který by vyhověl všem podmínkám.

Lasery je velké množství a každý něčím vyniká a je vhodný k určitému použití. Jednotlivé typy se také postupem času zdokonalovaly a vylepšovaly se jejich parametry. Nejlepší bude si lasery nějak rozdělit a každý typ krátce charakterizovat.

## Základní typy laserů

Lasery lze rozdělit podle různých kritérií. Podle povahy aktivního prostředí rozlišujeme lasery

- pevnolátkové (rubín, yttrium aluminium granát, skla, keramika)
- polovodičové
- plynové (atomární, molekulové, iontové)
- chemické
- kapalinové
- lasery využívající svazky nabitých částic

Podle způsobu čerpání energie (buzení) lze lasery rozdělit na lasery čerpané:

- opticky (výbojkou, jiným laserem, slunečním světlem a radioaktivním zářením) pro pevnolátkové a kapalinové
- elektrickým výbojem (srážkami v elektrickém výboji, svazkem nabitých částic, injektáží elektronů, interakcí elektromagnetického pole se shluky nabitých částic) pro plynové
- chemicky (energií chemické vazby, fotochemickou disociací, výměnou energie mezi molekulami a atomy)
- termodynamicky – tepelnými změnami (zahřáním a ochlazením plynu)
- jadernou energií (reaktorem, jaderným výbuchem)
- rekombinací (polovodičové)
- elektronovým svazkem
- injekcí nosičů nábojů

Z hlediska režimu práce mohou lasery pracovat

- kontinuálně (spojitě, nepřetržitě)
- impulsně (dlouhé, krátké, velmi krátké)
- pulsně

Lasery můžeme dělit také podle vyzařované vlnové délky na

- infračervené
- v oblasti viditelného světla (pásma)
- ultrafialové
- rentgenové

podle zúčastněných energetických hladin na kvantovém přechodu

- elektronové
- molekulární (rotační, rotačně – vibrační, vibrační)

Konečně můžeme lasery dělit podle použití na lasery

- výzkumné
- měřicí
- lékařské
- technologické
- energetické
- vojenské

Přidržíme se dělení podle povahy aktivního prostředí:

### Lasery využívající pevné látky - pevnolátkové

Do této skupiny patří lasery využívající rozptýlené ionty v krystalických nebo amorfních látkách, polovodičové lasery a lasery s krystaly s barevnými centry.

#### Pevnolátkový LASER - ( Rubínový )

Rubínový LASER, tak by se dal nazvat první ze zde představovaných LASERů, jak již název napovídá, tento LASER využívá za aktivní prostředí rubín v němž jsou rovnoměrně rozptýleny trojmocné ionty chrómu Cr<sup>3+</sup> v koncentraci asi 0,05%. Tyto ionty patří do skupiny materiálů, v nichž je možné dosáhnout inverze populace v tříhladinové soustavě kvantových přechodů. Jedná se o váleček, od deseti milimetrů, až do délky dvaceti centimetrů. Na obou koncích dokonale zaříznutý do úhlu 90 stupňů, a také dokonale vyleštěný. Na tyto plošky se také v některých případech napaňují kovy ( nejčastěji stříbro Ag ), které vytváří na jedné straně 100 procentně odrazovou plochu, a na druhé polopropustnou plochu ( zrcadlo ). Excitačními atomy jsou v tomto případě atomy Chrómu ( Cr<sup>3+</sup> ).

Celý váleček rubínu je tedy pak považován za aktivní prostředí. Zrcadla potom slouží jako onen rezonátor. Tím však celá konstrukce nekončí. Celé zařízení je většinou umístěno do tak zvané eliptické odrazové dutiny. Tím je myšleno prostředí, které je podobné elipsově nádobě, z vysokým odrazovým koeficientem jejích stěn a z venčí je vybavena chladičem ! Zde je pak umístěn rubínový váleček, a výbojová trubice, z dostatečným výkonem. V ní se používá za

náplň nejčastěji Krypton ( Kr ) nebo Xenon ( Xe ) pod tlakem 0.2 - 0.4 MPa. ( Výbojka i krystal se musí umístit do ohniskové přímky ! ) Ta zajišťuje světelné zařízení, které vstupuje do aktivního prostředí rubínu, a to i odrazem od stěn dutiny.

Každý takovýto vstup světla vybudí obrovské množství atomů, které jsou na vyšší energetické hladině, a to způsobí ono zmíněné zesílení světla. Chrom pohlcuje světelnou energii v žlutozelené a modrofialové oblasti. Protože horní energetická hladina, z níž dochází k přeskokům elektronů na základní hladinu, je rozštěpena na dvě navzájem blízké energetické úrovně, je generováno světlo dvou blízkých vlnových délek v oblasti červené barvy s vlnovými délkami 692.9 a 694.3 nm. Kratší vlnová délka výkonově převládá. Šířka pásma vyzařovaného světla je dosti velká a závisí na teplotě. Při 300K je řádu desítek GHz. Při snížení teploty na 77K ( zkvalněný dusík ) je šířka pásma asi 30x menší. Při této teplotě je generováno vlnění jediného vidu ( modu ). Rubínový laser pracuje obvykle v impulsním režimu. Délka budicího impulsu je několik desetin milisekund, až jedna milisekunda. Doba trvání výstupního impulsu by měla být co možná nejkratší, aby se dosáhlo co největší časové koncentrace energie, tj. co největší hustoty zářivého toku. Bez zvláštní konstrukční úpravy laseru trvá výstupní impuls přibližně jednu milisekundu a sestává z několika kratších impulsů. Výstupní impuls začíná se zpožděním za počátkem budicího impulsu, v okamžiku, kdy se dosáhne inverze populace a dostatečně se zvýší stimulovaná emise ( dosáhneme prahového zesílení v krystalu ). Laser za této situace pracuje v režimu tzv. relaxačního vyzařování, tzn. na dolní hranici možnosti generovat kmity, bez větší rezervy zesílení. Tento stav není výhodný. Výstupní impulsy jsou široké a hustota zářivého toku je malá.

Lepších výsledků se dosáhne následující úpravou: Čelní stěny krystalu nejsou opatřeny odrazivou vrstvou, ale jsou zabroušeny do rovin, svírajících s podélnou osou krystalu určitý úhel, nazývaný Brewsterův. Za těchto podmínek se světlo procházející ve směru podélné osy krystalu na rozhraní mezi krystalem a okolím neodráží ani nelomí. Mezi krystal a jedno ze zrcadel se vloží vrstva vhodné látky ( optický modulační prvek ). Tím se dosáhne zpoždění okamžiku, kdy vznikne lavinový proces nárůstu stimulované emise v důsledku mnohonásobných odrazů světla v rezonátoru. (Modulační prvek po určitou dobu zvyšuje ztráty v rezonátoru, takže nepřevládá zesílení ). Během tohoto času však probíhá proces buzení, tj. excitace dalších a dalších kvantových soustav. Dochází k nahromadění počtu excitovaných kvantových soustav. Po překonání určitého stavu modulačního prvku náhle ztráty v rezonátoru klesnou, převládne zesílení a dojde k prudkému vzrůstu stimulované emise. Výstupní světelný impuls je pak velmi krátký. Záření má obrovskou hustotu, odpovídající okamžitému výkonu řádu 10 na 9 wattů. Střední hodnota výkonu rubínových laserů je však malá, řádu desítek miliwattů. Celková účinnost je pouze několik procent. Při kontinuálním provozu je nutné účinné chlazení celého zařízení. Ovšem i přes toto všechno je výkon rubínového LASERu velmi malý !

### Polovodičový LASER

Dalším je tak zvaný polovodičový LASER, v tomto případě jde opět o tak zvaný pevnolátkový LASER. Jeho bráškou jsou LASERY s neodymovým sklem, kde jsou rozptýleny ionty neodymu. Tento LASER, má jednu velikou výhodu, a to že se může vyrábět v prakticky neomezených rozměrech a dosahovat tak velikých LASERových energií. Atomy neodymu pracují jako čtyřhladinový systém. Laser vyzařuje infračervený paprsek o velké energii. Pokud jde o YAG laser, vyznačuje se vysokou účinností, stačí jej osvětlit pouhou žárovkou a může vydávat spojité světlo o výkonu stovky wattů. V poslední době se osvědčují i takzvané YAP LASERY s krystalem yttrio - hlinitého perovskitu.

### Injekční polovodičový laser

Vedle korundu, skla a yttrio-hlinitého granátu se jako základní materiál používá fluorit, wolfram vápenatý a jiné. Jako aktivní příměsi slouží většinou prvky vzácných zemin: chrom, kobalt, nikl nebo uran. Tyto prvky vydávají převážně červené a infračervené záření.

### Polovodičový laser s heterostrukturou

Vlastnosti polovodičových krystalů, zejména přechodu PN byly zkoumány již dříve a tak se také brzy zrodila myšlenka využít elektroluminiscenční vlastnosti polovodičů k sestavení laseru. Polovodičové lasery lze také zařadit mezi lasery pevnolátkové, mají však své zvláštnosti a významné použití především v optoelektronice.

První polovodičové LASERY byly injekčního typu, využívaly tedy vlastnosti PN přechodu a jako nejvhodnější materiál se ukázal arsenid galitý. K nevýhodám tohoto laseru patří nutnost jeho chlazení na teplotu kolem 77 kelvinů tekutým dusíkem. Laser pracuje na vlně 0.840 mikrometrů a jeho výkon a účinnost silně závisí na provozní teplotě. V dalším vývoji polovodičových laserů sehrála zásadní úlohu práce sovětských vědců, kteří našli způsob vytváření struktur s heteropřechody. Tak laser na struktuře AlGaAs může pracovat již při pokojové teplotě a s účinností kolem 20 procent a dávat kolem 200 miliwattů nepřetržitého výkonu. Vedle injekčních polovodičových laserů se podařilo realizovat i elektroionizační polovodičové lasery, například na krystalu sulfidu kademnatého. Laser vydává při pokojové teplotě zelené světlo o vysokém impulsním výkonu.

Pro napájení Polovodičových LASERů se musí používat speciální elektroniky, tedy krom LASERových diod, které již již nemají zabudovanou v sobě.

## Plynové lasery

Plynové lasery se ukázaly jako velmi perspektivní a mohutné zdroje infračerveného i ultrafialového záření a našly významné uplatnění v technice a technologii. Je to dáno tím, že objem plynu je možno podle potřeby zvětšovat, plynulým přítokem je možné dodávat stále nové aktivní prostředí a je možno je čerpat nejrůznějšími mechanizmy, elektricky, chemicky apod. Plynové lasery mají vyšší účinnost, protože přeměna elektrické energie ve výboj je hospodárnější. Proto tyto lasery pracují v nepřetržitém režimu, ale jejich trvalý výkon není moc velký.

### Helium-neonový laser

Z plynových laserů se stal nejznámějším laser helium - neonový generující jak červené (na vlně 0,6328 mikrometru), tak infračervené záření. Helium-neonový laser tvoří dlouhá skleněná trubice naplněná směsí neonu a hélia, v níž se budi elektrický výboj na vysokém kmitočtu nejčastěji vnějšími elektrodami. Konce trubice bývají zkoseny pod Brewsterovým úhlem a celá trubice je umístěná mezi zrcadly vnějšího rezonátoru. Jako aktivní plyn působí neon. Paprsek má vysokou stabilitu kmitočtu (vyšší než u maseru) a malou rozbíhavost. To předurčuje helium-neonový laser k funkci přesných hodin, přesného dálkoměru a k účelům telekomunikačním a geodetickým.

### Argonový laser

Argonový laser vydává modrozelené světlo (zelené na vlně 0,514 mikrometru a modré na vlně 0,488 mikrometru). Je pro něj typická vysoká hustota elektrického proudu protékajícího výbojem a vysoká teplota. Výbojová trubice se obvykle zhotovuje z keramického materiálu a proud se izoluje od stěn magnetickým polem. Laser je schopen generovat desítky wattů ve spojitém režimu a je vhodný i pro technologické účely. Podobné vlastnosti má i kryptonový a kadmiový laser a lasery s parami kovů, například mědi. Helium-kadmiový laser je zajímavý tím, že je třibarevný - vyzařuje světlo modré, zelené a červené

### Cadmium-Neonový laser

Je zajímavý tím, že je třibarevný - vyzařuje světlo modré, zelené a červené.

### Dusíkový laser

Další z řady LASERů je tak zvaný plynový LASER. Jak již naznačuje sám název, aktivním prostředím v tomto LASERu je plyn v našem případě směs plynů. Tyto LASERY mají úplně shodné principy jako LASERY pevnolátkové s tím rozdílem, že zde není přítomna budicí dutina, ani vnější výbojky. Proto jsou tyto LASERY také o mnoho levnější, spolehlivější, a výkonější. Ale i přes všechny tyto klady je tu jeden, který vítězí nad všemi, a to ten fakt, že tyto LASERY mohou pracovat v kontinuálním režimu. ( Můžou pracovat stále, bez přerušování ).

Po dlouhou dobu nebyly k dispozici lasery generující ultrafialové záření. Podařilo se ho nakonec získat pomocí speciálních laserů plynových ( dusíkový laser ), avšak rozhodující obrat znamenaly až lasery excimerové. Tato skupina laserů využívá jako aktivního prostředí zvláštního druhu molekul, excimerů, vytvářených za účasti atomů vzácných plynů. Tyto molekuly, jinak nestabilní, mohou existovat jen za zvláštních podmínek, například v plynovém výboji, s atomy ve vysoce vybuzených, excitovaných stavech. Při rozpadu těchto exotických molekul vzniká právě ultrafialové záření. První excimerový laser byl realizován v roce 1970. Šlo o laser s kapalným xenonem buzený elektronovým svazkem. V roce 1976 se pak objevily plynové excimerové lasery s excimery XeF, KrF, ArF, tedy molekulami tvořenými atomy vzácných plynů a fluoru.

### LASER CO<sub>2</sub> - s oxidem uhličitým

Nejvýkonnějšími z plynových laserů se staly laser s oxidem uhličitým a lasery chemické. Laser s oxidem uhličitým generuje infračervené záření na vlně 10,6 mikrometru, tedy právě uprostřed atmosférického okna. Vzhledem k velikosti trubice může podávat vysoké výkony. U tohoto laseru se postupně uplatňovaly nové způsoby čerpání energie. V roce 1966 využití tepelné energie, která vzniká při prudké expanzi zahřátého plynu. Tak byly realizovány gazodynamické lasery s rychlým, nadzvukovým proudem oxidu uhličitého. V letech 1970-1971 to pak bylo čerpání pomocí svazku elektronů ( elektroionizační lasery EIL ). To umožnilo použít plyn pod vysokým tlakem a dále zvýšit laserový výkon. V roce 1969 vznikly v USA lasery s oxidem uhličitým pod atmosférickým tlakem a s příčným buzením ( tak zvané TEA lasery, transverse excitation atmospheric - příčné buzení, atmosférický ). Takové lasery umožní vytvořit výkonné tepelné stroje s uzavřenou cirkulací plynu, v nichž se tepelná energie mění v obrovskou energii infračerveného záření. CO laser nachází uplatnění v technologii, ve vojenské a kosmické technice a ve vědeckém výzkumu.

Samotná konstrukce plynového laseru je velmi jednoduchá:

Vlastně by nám na vše stačila dlouhá skleněná trubice, se dvěma elektrodami, a zabroušenými konci. Ale ne každý má přístup k tomu, aby si mohl takovouhle trubici zhotovit.

Ač se to zdá velmi pracné na výrobu, a ne moc lehké, je to jen fikce, ve skutečnosti je to velmi jednoduché, jedná se o pár izolantů, kovových tyček, pár matiček, a dvou skleněných trubiček. Izolační sloupek je potřebný, protože každý konec hlavice tvoří jednu elektrodu, kdyby jste tedy nepoužili sloupek, závitová tyč by jisto jistě udělala zkrat mezi anodou a katodou. Špunt, který obepíná křehkou výbojovou trubici, ve které je aktivní prostředí, a také zároveň utěsňuje konce druhé trubice, ve které proudí chladicí médium. Není podmínkou, ale doporučuje se ! Trubice, ve které proudí

chladicí médium, je možné použít vzduch, destilovanou vodu i jiné látky. Odvod nebo přívod chladicího média. Může to být skleněná nebo kovová trubička, pokud bude kovová, je třeba dávat pozor, aby se nedotýkala elektrod. Zrcátko, na jedné straně zcela odrazné, a na druhé polopropustné. Většinou se používá napařované stříbro. Skleněná trubička, ve které je napařeno aktivní prostředí. Může se použít i trubička z konci z vodivých materiálů. ( Napařováním kovů se na konci udělá souvislá vrstva kovu ). Nebo se ponoří do tekutého stříbra. Zlepšuje se tím vlastnost elektrody. Vstup či výstup kterým se plní trubička aktivním prostředím.

Přesné Ingredience na uvaření LASERu jsou zde: Nejdřív zrcadla. První zrcadlo má 80 procentní reflektivitu (odrazovost ) Napařovaný kov je většinou Germánum. Druhé zrcadlo je 100 procentně reflexivní. Lze použít napařované stříbro. Směs plynů v LASERu je následovná, jedná se přesně o 80 procent Helia ( He ) + 15 procent Dusíku ( N<sub>2</sub> ) + 5 procent Kyslíčnicku Uhlíčitého ( CO<sub>2</sub> ) a to vše při tlaku kolem 1 Toru. Celé je to chlazené buď plynem nebo vzduchem, při čemž plyn je nevhodnější právě CO<sub>2</sub> a kapalina destilovaná voda. Napájeno to je pak vše VVN generátorem pro neonová svítidla. Něco kolem 15 000 Voltů, ale nezkoušet cívkou z auta, určitě by neměla dostatečný výkon. Délka trubice je podle hesla čím delší tím lepší. Ale minimálně by měla být asi kolem 1.3 m. Průměr pak okolo 1 - 3 cm. Ještě jedno důležité upozornění, aby vše pořádně těsnilo, jsou všude použity O kroužky.

Barva tohoto LASERu je světle modrá, a jeho výkon a paprsek je opravdu skvělý. Hlavně pozor na oči, nezapomínat, že škodit může i to co není vidět. Jeho výkon by podle autora měl být kolem 40 mW na 28.3 THz.

### Chemický laser

Chemické lasery využívají k čerpání energie do aktivního prostředí energie exotermických řetězových chemických reakcí. První takový laser s použitím reakce mezi vodíkem a chlorem byl zkonstruován v roce 1965 a první výkonné lasery tohoto druhu založené na reakci vodíku a fluoru vznikly v roce 1969. Zvláštním druhem chemického laseru založeného na disociaci molekul ultrafialovým zářením (takzvaný fotodisociační laser) je laser jódový.

### Lasery kapalinové

Kapalinové lasery pracující s cheláty různých prvků vzácných zemin se objevily již v roce 1963. Výhodou je, že můžou zabírat neomezeně velký objem a jsou dokonale homogenní. Nevýhodou ale je, že se chemicky rozkládají.

Důležitou skupinou jsou však zejména barvivové lasery, které využívají roztoků různých organických látek, například rhodaminu. K těmto kapalinovým laserům patří i lasery na barevných centrech, krystalech s různými defekty vyvolávající absorpci na různobarevných spektrálních čárách (krystal KCl s příměsí lithia). Barvivové lasery a lasery na barevných centrech mají společnou vlastnost, která je předurčuje k použití ve spektroskopii a v informační technice. Jsou přeladitelné a vlnovou délku laserového záření lze u nich plynule měnit.

### Lasery využívající svazky nabitých částic

Tyto lasery nepracují na kvantových přechodech, ale využívají synchronizované oscilace částic. Byly vytvořeny lasery se svazky rychlých elektronů, takzvané FEL lasery - zkratka za free electron lasers, lasery na volných elektronech, případně jiných nabitých částicích. Takové lasery mají těsnou návaznost na urychlovače.

### Použitá literatura

E. J. Strumban, I. Štoll: Lasery a optoelektronika (Praha, Panorama 1989)

I. Štoll: Paprsek budoucnosti (Praha, Pressfoto 1975)

K. Sedláček: Laser v mnoha podobách (Praha, Naše vojsko 1982)

E. Svoboda a kol.: Přehled středoškolské fyziky (Praha, Prometheus 1998)