

Kapitola 9

Pevnolátkové lasery

Po objevu rubínového laseru, tj. laseru s aktivním materiálem $Al_2O_3:Cr^{3+}$, bylo vyzkoušeno mnoho dalších aktivních přechodových prvků, které, zabudovány do vhodné matrice, měly předpoklady dát laserovou generaci. Historicky nejúspěšnějším se stal iont Nd v matrici yttrium aluminium granátu – $Nd:YAG$ ($Y_3Al_5O_{12}:Nd^{3+}$) [16]. Poslední léta jsou opět poznamenána zvýšeným zájmem o pevnolátkové lasery vzhledem k jejich relativní stabilitě aktivního materiálu a jednoduchosti systému (ve srovnání s barvivovými a plynovými vysokovýkonovými lasery) a dále potřebou generace nových vlnových délek. Zájem o nové vlnové délky je spojen s programem rozvoje komunikací, s lidarovou technikou a s aplikacemi v medicíně. Jeden z prvních aktivních materiálů objevených a s úspěchem vyzkoušených v tomto období byl neodým dopovaný yttrium-aluminium peovskit – $Nd:YAP$ ($YAlO_3:Nd^{3+}$) a v letech osmdesátých krystal $Cr:BeAl_2O_4$ – alexandritový laserový přeladitelný materiál.

Po objevu tohoto laseru pracujícího při pokojové teplotě nastal bouřlivý rozvoj přeladitelných pevnolátkových laserů. Výzkum je veden dvěma směry; jeden se soustřeďuje na vyhledávání nových matric pro trojvalentní chromové ionty (Cr^{3+}) a druhý směr zkoumá nové ionty, které by laserovaly ve vhodných matricích. Výsledkem bylo zjištění dvou desítek materiálů, které fungují jako matrice pro chromový iont a vytváří přeladitelný laserový materiál a dále

byl úspěšně vyzkoušen nový laserující trojvalentní iont titanu (Ti^{3+}), dvojvalentní rhodium (Rh^{2+}) a znovu objevené přeladitelné laserové materiály založené na dvojvalentních přechodových kovových iontech Ni^{2+} , Co^{2+} a V^{2+} .

9.1 Aktivní prostředí pevnolátkových laserů

Pevnolátkový laser je laser, jehož aktivním prostředím je dielektrikum — pevná opticky propustná látka — matrice obsahující poměrně malou koncentraci stechiometricky uložených iontů aktivátoru. Všechna aktivní prostředí pevnolátkových laserů jsou současně účinnými luminofory.

9.1.1 Matrice

U pevnolátkových iontových laserů je matrice základním materiálem, který určuje většinu technických (fyzikálních a chemických) vlastností daného krystalu. Na materiál matrice jsou kladeny požadavky chemické stability a mechanické pevnosti, tepelné odolnosti a snadného mechanického opracování (leštění povrchů materiálu do optické kvality). Matrice musí být průhledná pro budící i generované záření, opticky homogenní a musí být technologicky možné ji uměle vyrábět. Materiály, které vyhovují těmto požadavkům, jsou:

1. krystaly
2. skla
3. keramika.

1. Krystalické materiály se dělí na několik skupin:

- (a) **oxidy** — z nich nejznámější je safír Al_2O_3 . Je tvrdým materiálem s vysokou termální vodivostí. S aktivními ionty chromu vytváří krystal rubínu $Al_2O_3 + Cr^{3+}$.
- (b) **granáty** — jsou krystalické sloučeniny typu $A_3B_5O_{12}$ nebo typu $A_3B_2(BO_4)_3$, kde symbol A označuje ionty yttria nebo lanthanidů a symbol B může být hliník, galium, železo, indium, chrom a

další. Nejvýznamnější z nich je sloučenina $Y_3Al_5O_{12}$ – yttrium aluminium granát YAG. Je to tvrdý izotropní krystal, který lze uměle vypěstovat ve velmi dobré kvalitě. S aktivními ionty neodymu vytváří dnes jeden z nejrozšířenějších pevnolátkových aktivních materiálů – Nd:YAG. Dalšími maticemi jsou yttrium-gadoliniový granát $Y_3Ga_5O_{12}$ (YGAG) nebo gadolinium-galiový granát $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GdGaG) nebo gadolinium-skandium-hliníkový granát (GADsCAG).

- (c) **alumináty** — např. krystal yttrium-orthoaluminát $YAlO_3$, nazývaný YALO, YAP nebo Perovskit, je dalším maticovým materiálem s velkou tvrdostí a vodivostí. Jeho význam v současné době velmi stoupá a přibližuje se využití krystalu YAG. Fyzikální a spektroskopické vlastnosti krystalů YAG a YAP jsou téměř srovnatelné. Liší se hlavně tím, že YAP je krystalem orthorombickým a tedy je anizotropním prostředím na rozdíl od krystalu YAG, který krystalizuje v soustavě kubické a je tedy izotropním prostředím. Důležitou výhodou YAP-ové matrice je skutečnost, že tento krystal roste rychleji a lze jej tedy vypěstovat s lepší homogenitou než matici YAG.
 - (d) **Fluoridy** — jsou relativně měkké, izotropické krystaly.
 - (e) **Oxysulfidy** — lanthan, gadolinium, yttrium a lutecium oxysulfid mají jednoosou krystalickou strukturu, jsou opticky anizotropní.
 - (f) **Fosfáty a silikáty** — kalcium fluorofosfát nebo fluorapatit, silikátový oxyapatit.
 - (g) **Tungstáty, molybdáty, vanadáty a beryláty.**
2. Skla jsou velmi důležitými maticemi. Jejich výhodou (ve srovnání s krystalickými materiály) je snadnější výroba, která umožňuje dosáhnout výbornou homogenitu skla a ve srovnání s krystaly mnohem větší rozměry. Také opracování skla je jednodušší a lze dosáhnout výborné optické kvality povrchu. Nevýhodou skleněných matic je menší tepelná vodivost a v některých případech menší tvrdost ve srovnání s krystalickým materiálem. Sklo s ionty neodymu (Nd:sklo) dovoluje vytvářet aktivní laserové prostředí velkých objemů.

3. Keramika — výhodou této matrice je nízká cena ve srovnání s krystaly nebo sklem a vyšší tepelná vodivost než má sklo.

9.1.2 Aktivátor

Aktivátory (luminiscenčními centry) jsou atomy nebo ionty umístěné v matrici, zúčastňující se procesu generace optického záření. Výběr aktivátorů přidávaných do matric plyne z požadavků kladených na pevnolátkové laserové materiály, které mají mít:

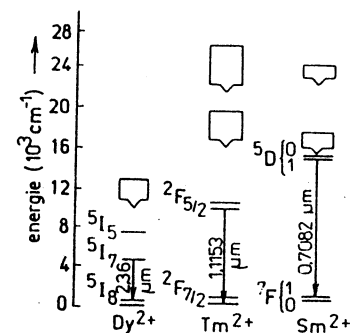
1. na laserovém kvantovém přechodu co nejmenší šířku spektrální čáry,
2. vysoký kvantový výtěžek luminiscence,
3. silné absorpční pásy, které zvyšují účinnost buzení.

Dále dolní laserová hladina by měla být rychle vyprazdňována. První podmínka je nejpodstatnější a omezuje použité látky na takové, které mají nezaplňněnou vnitřní slupku elektronového obalu. Jsou to atomy: transitní skupiny prvků (*Fe*, *Cr* atd. s nezaplňněnou slupkou 3d), vzácných zemin (*Sm*, *Nd* atd. s nezaplňněnou slupkou 4f) a skupiny aktinidů (*U* s nezaplňněnou slupkou 5f).

Luminiscenční centrum *tranzitních prvků* je tvořeno iontem prvku, v němž nastávají přechody uvnitř slupky 3d. Absorpční spektrum těchto prvků se skládá ze širokých absorpčních pásů se značně vysokou hodnotou absorpčního koeficientu, což usnadňuje buzení luminiscence a tedy i čerpání laserů. Nejznámějším z těchto prvků je chrom (*Cr*), jehož trojmocný iont (Cr^{3+}) je použit při výrobě krystalu rubínu. Laserová akce byla pozorována i u dalších iontů této skupiny např. Ni^{2+} a Co^{2+} . Jejich užití není ale zatím rozšířeno.

Největší skupinu aktivátorů druhé skupiny tvoří *vzácné zeminy* (lanthanidy). Rozpadají se na dvě části lišící se absorpčním spektrem: na dvojmocné zeminy (Sm^{2+} , Dy^{2+}) s relativně silnými absorpčními pásy a trojmocné vzácné zeminy (Nd^{3+} , Pr^{3+} , Tm^{3+} , Gd^{3+} , Ho^{3+} , Yb^{3+}), jejichž absorpční pásy jsou podstatně slabší. Spektrum atomů vzácných zemin v monokrystalech je velice blízké spektru izolovaných atomů. Je to důsledek toho, že nezaplňněná

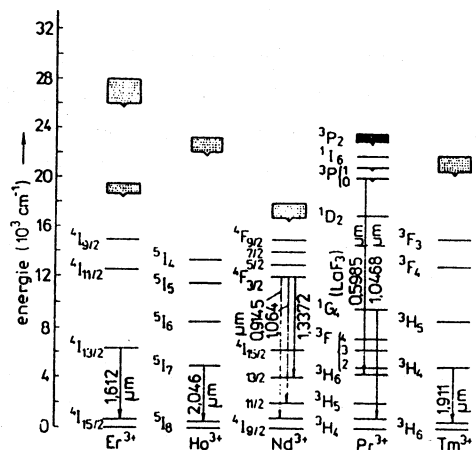
slupka 4f u vzácných zemin je položena blíže k jádru než slupka 3d u elementů skupiny železa. Dále tato slupka je stíněna od elektrického pole mřížky dvěma elektrony 5s a šesti elektrony 5p. Proto poloha energetických hladin iontů vzácných zemin pouze slabě závisí na typu krystalu a pro každý je charakteristická existence úzkých čar fluorescence odpovídajících přechodům z jednoho stavu obálky 4f do druhého stavu téže obálky. Kromě toho ionty vzácných zemin mají intenzivní pásy absorpce odpovídající přechodům mezi obálkami 4f na 5d. Pro dvouvalentní ionty jsou tyto přechody ve viditelné a v blízké infračervené oblasti spektra a jsou velmi vhodné pro optické čerpání.



Obr. 9.1: Diagram energetických hladin dvouvalentních iontů dysprosia, thulia a samaria v krystalu CaF_2

Dvojmocné vzácné zeminy (samarium, dysprosium, thulium). Intenzivní absorpce je umožněna dovolenými přechody 4f na 5d. Luminiscenční vlastnosti jsou velmi výhodné, zejména za nízkých teplot, kde je už do značné míry vyprázdněna terminální hladina 7F_1 , takže inverse se uskutečňuje proti téměř prázdné úrovni umístěné nad základní hladinou 7F_0 . Emisní spektrum se skládá z řady velmi úzkých čar v okolí 700 až 800 nm, z nichž nejintenzivnější je čára 708,5 nm. Sm^{2+} , Dy^{2+} , Tm^{2+} byly použity jako laserové

materiály po zabudování do matrice CaF_2 . Pro laserovou akci musí být tyto krystaly chlazené nejméně na teplotu 77 K. Schéma energetických hladin dvouvalentních iontů vzácných zemin je na obr. 9.1.



Obr. 9.2: Diagram energetických hladin třímocných iontů erbia, holmia, neodymu, praseodymu a thulia v krystalu $CaWO_4$

Třímocné vzácné zemin. Laserový efekt byl získán u třívalentních iontů neodymu, praseodymu, thulia, holmia, ytterbia, gadolinia a erbia umístěných do různých matic. Diagramy energetických hladin některých z těchto aktivních prostředí jsou na obr. 9.2 Na rozdíl od dvojmocných zemin se přechody mezi slupkami 4f na 5d nacházejí v ultrafialové části spektra a jsou málo vhodné pro optické čerpání. Absorpce u třívalentních iontů nastává pouze uvnitř slupky 4f (přechody 4f na 4f) a je poměrně malá. Nejvýznamnější ze třívalentních iontů vzácných zemin je neodym. Stimulovaná emise byla získána nejméně ve čtyřiceti různých materiálech, kdy do matrice byly zabudovány ionty neodymu. Nejvýznačnější maticí pro ionty neodymu jsou sklo a yttrium-

aluminium-granát YAG a v dnešní době i yttrium-aluminium-perovskit YAP. Stimulovaná emise zde byla získána na třech skupinách frekvencí: $0,9 \mu\text{m}$, $1,06 \mu\text{m}$, $1,35 \mu\text{m}$ odpovídajících přechodům ${}^4F_{3/2}$ na ${}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{11/2}$, ${}^4I_{13/2}$. Dalším zajímavým aktivátorem je erbium. Laserové oscilace byly dosaženy na vlnových délkách $1,53$ až $1,60 \mu\text{m}$ a $2,82$ až $2,94 \mu\text{m}$. Maticí pro tento aktivátor je YAP, YAP, YLF, LaF_3 a další materiály. Lasery užívající jako aktivátoru iontu holmia pracovaly na teplotě kapalného dusíku. V dnešní době je do holmiových krystalů přidáván ještě senzibilizátor — ionty chromu a thulia. Nejúspěšnější maticí je YAG. Stimulovaná emise lze dosáhnout na řadě dalších iontů této skupiny: praseodymu, thulia, gadolinia, ytterbia.

Aktinidy jsou další velkou skupinou prvků s nezaplněnými vnitřními slupkami. Aktinidy mají nezaplněnou slupku 5f, která je z části odstíněna elektrony 6s a 6p. Většina aktinidových prvků je radioaktivní. Úspěšná stimulovaná emise byla dosažena u uranu, jehož iont U^{3+} byl umístěn do matrice CaF_2 . Absorpční spektrum U^{3+} má pouze několik účinných absorpčních pásů u 1250 nm a 850 nm . Emise se uskutečňuje přechodem mezi ${}^4I_{11/2}$ a terminální hladinou, která je 500 až 600 cm^{-1} nad základní hladinou. Emise leží v infračervené oblasti kolem 2500 nm . Při výkonném chlazení bylo dosaženo i kontinuálního provozu.

9.1.3 Výroba aktivních materiálů

Aktivátory jsou přidávány do krystalů již během jejich růstu. Pěstování krystalů pro lasery je náročná operace, vzhledem k vysokým požadavkům na optickou homogenitu a luminiscenční čistotu. Nejvýznamnější jsou čtyři metody pěstování krystalů. Čochralského metoda růstu krystalů, Verneuilova metoda, Stockbauerova metoda a metoda zonální tavy.

Při Čochralského metodě je pevný krystal pomalu vytahován z kapalné taveniny na zárodku vysoce kvalitního materiálu. Pro vypěstování kvalitních monokrystalů se užívá speciálních typů kelímků, ve kterých je umístěn roztažený materiál. Při růstu je nutno v peci udržovat stálé podmínky. Krystaly

pěstované touto metodou jsou např. rubín, *Nd:YAG*, *Nd:YAP* a další.

Verneuilova metoda používá pro pěstování syntetických monokrystalů krystalizace z roztavených částecek látky v kyslíkovém plameni. Směs matrice a aktivátoru se v práškové formě sype shora na zárodek pěstovaného krystalu, jehož horní okraj je držen v plameni hořáku s teplotou tavení krystalu. Krystal je postupně spouštěn dolů. Rztavená vrstva po výstupu z plamene krystalizuje. Při použití této metody je obvykle dosahováno menší homogenity vyrobených krystalů než při použití metody Čochralského.

Ve *Stockbauerově metodě* krystaluje roztavená látka ve špičatém kelímku (křemen, grafit, keramika) postupným tuhnutím od špičky kelímku.

Při metodě *zonální tavy* špičatá lodička s materiálem projíždí teplotním gradientem tak, aby materiál byl roztaven a ztuhl opět ve formě monokrystalu. U těchto metod je potíž s nerovnoměrně rozděleným aktivátorem a dále s materiálem kelímku. (Body tání jsou příliš vysoké).

Nejlépeších výsledků při pěstování laserových krystalů bylo dosaženo v poslední době metodou Čochralského, při které se monokrystalický ingot vytahuje z taveniny.

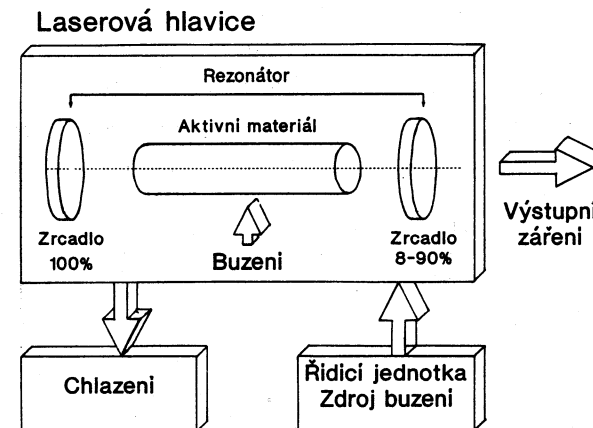
9.2 Laserový systém

Součástí pevnolátkového laseru je (viz obr. 9.3):

1. laserová hlavice obsahující aktivní materiál, budící element (výbojky), budící dutinu a otevřený rezonátor
2. zdrojová jednotka
3. chladicí jednotka.

9.2.1 Hlavice laseru

Aktivním prostředím je laserový krystal zpravidla opracovaný do tvaru válce s válcovou plochou matnou a s čely opticky vyleštěnými. Čela krystalu jsou zpravidla kolmá k ose válce, nebo jsou skosená pod určitým pevně daným úhlem.



Obr. 9.3: Součásti pevnolátkového laseru

Pro buzení pevnolátkových laserů se používá především optického buzení — světla ze speciálně vybraných zdrojů, obvykle výbojek. Zpravidla se užívají xenonové (impulsní) nebo kryptonové (kontinuální) výbojky, které nejvíce vyhovují svým emisním spektrem. Výbojka je tvořena lineární nebo spirálovitou křemennou trubicí, v jejichž koncích jsou zataveny dvě elektrody a obsahuje plynovou náplň. Standartní lineární impulsní výbojka má tloušťku stěny trubice 1 až 2 mm, vnitřní průměr od 3 do 19 mm a délku od 50 mm do 1 m. Plynovou náplň bývá nejčastěji xenon o tlaku od 0,04 do 0,09 MPa. Standartní kontinuální výbojka má průměr od 2 do 10 mm a délku od 40 do 150 mm a je naplněna kryptonem pod tlakem 0,2 až 0,4 MPa.

Laserový krystal u prvního rubínového laseru byl vložen do osy spirálové xenonové výbojky, v pozdějších konstrukcích byl pokládán rovnoběžně s výbojkou lineární. Protože ztráty přenosu světelné energie byly velké, umísťuje se dnes laserový krystal a budící výbojka (příp. výbojky) do tzv. budící dutiny,

jejímž úkolem je koncentrovat a odrážet co nejvíce světla vyzářeného výbojkou na aktivní prostředí. Aby koncentrace světelné energie byla co největší, má budící dutina speciální tvar (jednoelipsa, dvouelipsa, čtyřelipsa, atd. viz obr. 9.4). Pro zvýšení odrazivosti je vnitřní stěna budící dutiny pokovena, obvykle vrstvou stříbra, zlata nebo dielektrickými vrstvami.

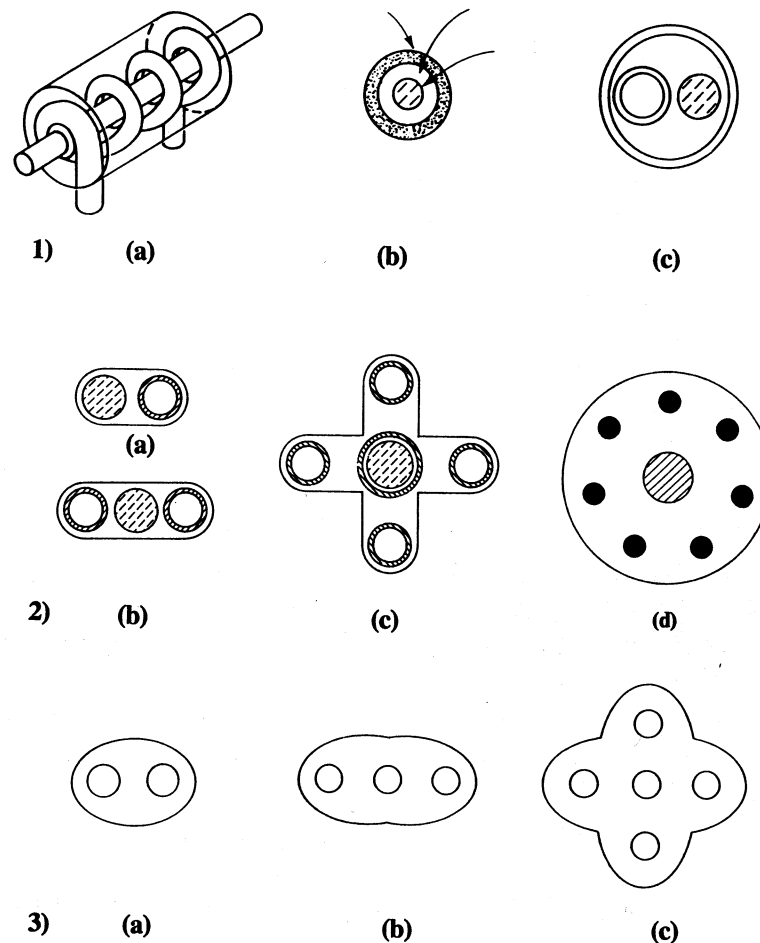
Otevřený rezonátor je tvořen obvykle zrcadly s kruhovou aperturou, z nichž jedno je zpravidla totálně odrazné ($R = 100\%$) pro záření generované vlnové délky a druhé částečně propustné. Pro kontinuální pevnolátkové lasery je odrazivost výstupního zrcadla $R = 90$ až 99% , pro pulsní $R = 8$ až 50% .

Takovéto uspořádání hlavice laseru je nejjednodušším případem. Mezi zrcadly rezonátoru mohou ve speciálních případech být umístěny další optické elementy ovlivňující výstupní parametry generovaného záření — délku impulsu, energii, spektrum záření, atd. Příkladem těchto elementů jsou clonka, mřížka, Fabry-Perotův etalon, teleskop a další.

9.2.2 Zdrojová část laseru

Úkolem zdrojové jednotky je dodat dostatečné množství energie do výbojky v impulsním nebo kontinuálním režimu.

K napájení impulsní výbojky slouží budící obvody laserového zdroje obsahující kondenzátor o kapacitě C , který se přes tlumivku o indukčnosti L vybíjí do výbojky. Důležitým parametrem při provozování impulsní výbojky a tím i laserového zdroje je explozní energie výbojky udávající energii, při níž dojde k destrukci výbojky. Explozní energie E^{ex} (J) xenonové impulsní výbojky o vnitřním průměru trubice d (mm), vzdálenosti mezi elektrodami L (mm) a tlaku xenonu $0,06$ MPa se vypočte ze vztahu $E^{ex} = 60Ldt_p$, kde t_p (s) je délka optického impulsu výbojky. Při provozu impulsní výbojky je třeba, aby energie do ní dodávaná byla podstatně menší než explozní energie, neboť pro životnost impulsní výbojky, udávající počet záblesků N , za který se sníží optická energie vyzařovaná výbojkou na 50% počáteční hodnoty, platí



Obr. 9.4: Budící dutiny

- 1) Difuzní reflexní dutiny: (a) spirálová výbojka, (b) koaxiální výbojka, (c) difuzní odražeč;
- 2) Těsné uzpořádání: (a) jednovýbojkové, (b) dvouvýbojkové, (c) čtyřvýbojkové, (d) vícevýbojkové;
- 3) Eliptické uspořádání: (a) jednoelipsa, (b) dvouelipsa a (c) multielipsa.

empirický vztah $N = \left(\frac{E_{ex}}{E_0}\right)^{8,5}$.

K napájení kontinuální výbojky slouží budící elektrický obvod, který je zdrojem proudu od 10 do 60 A. Maximální příkon, např. kontinuální výbojky o vnitřním průměru trubice 7 mm a vzdálenosti mezi elektrodami 75 mm, je 6000 W. Životnost výbojky při tomto příkonu je asi 200 h.

9.2.3 Chladicí část laseru

Účinnost převodu energie buzení v energii optického záření je velmi nízká (zlomky procent). Podstatná část energie buzení se uvnitř hlavice přemění na teplo. Takže je možné souhlasit se závěrem jednoho z diplomantů, že „Laser je drahé zařízení na ohřívání vody“.

Úkolem chladicí jednotky je odebrat aktivnímu prostředí teplo vydělené při nezářivých přechodech aktivních iontů i teplo ztracené vinou parazitní absorpce ve všech materiálech uvnitř laserové hlavice. Množství generovaného tepla pevnolátkových laserů je značné, od několika W do desítek kW. V případě, že aktivní prostředí není dostatečně chlazené, dochází ve většině případů k posunu spektrálních čar a k přerušení generace záření. Z tohoto důvodu, aby chlazení bylo dostatečné, je používáno chlazení tekutinou namísto vzduchového.

Chlazení je principiálně koncipováno dvojím způsobem:

1. chladicí tekutina (zpravidla destilovaná voda) protéká celou budící dutinou
2. laserový krystal a výbojky jsou umístěny ve skleněných trubicích a voda protéká těmito trubicemi.

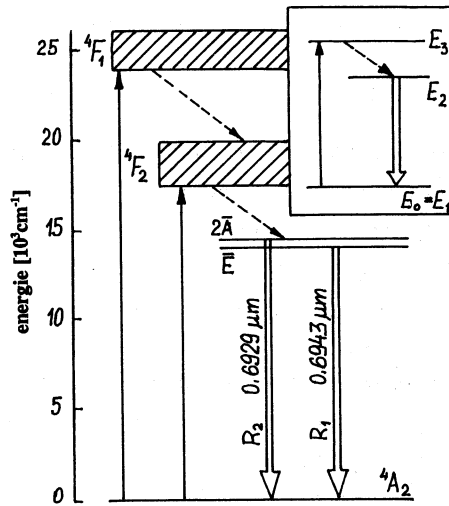
Chladicí jednotka je v nejjednodušším případě složena z rezervoáru a termostatu udržujícího stálou teplotu kapaliny s přesností $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

9.3 Vybrané pevnolátkové lasery

9.3.1 Rubínový laser

Rubínový laser je pevnolátkový laser, jehož aktivním prostředím je krystal rubínu generující záření o vlnové délce $0,6943\ \mu\text{m}$. Rubínový laser byl prvním laserem. Zkonstruoval ho a uvedl do provozu Teodor Maiman v roce 1960. Aktivním prostředím rubínového laseru je monokrystal rubínu $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}^{3+}$. Rubín, známý již před mnoha lety jako drahokam, je krystalický materiál, jehož matici tvoří safír (Al_2O_3) a aktivátorem jsou ionty chromu Cr^{3+} . Krystalografická soustava rubínu je romboedrická. Rubín je jednoosý krystal s osou symetrie 3.řádu totožnou s optickou osou krystalu c. Iont hliníku, je obklopen šesti ionty kyslíku O^{2-} tvořícímu oktaedr. Iont kyslíku obklopují čtyři ionty hliníku. Poloměry iontů chromu a hliníku jsou dostatečně blízké, takže výměna atomů matrice (hliníku) za atomy aktivátoru (chromu) nezpůsobuje porušení krystalické mřížky. Safírová matrice zajišťuje krystalu rubínu význačné chemické a fyzikální vlastnosti. Teplota tání je 2020 až 2040°C , hustota $3,92\ \text{gcm}^{-3}$. Krystal je chemicky stabilní, mechanicky pevný (dosahuje tvrdosti č.9 Mohsovy stupnice) a je obrobitelný. Má velkou teplotní vodivost. Při teplotě tekutého dusíku je teplotní vodivost několikrát vyšší než u mědi. Se zvýšením teploty se zmenšuje (při $293\ \text{K}$ je přibližně dvakrát menší než při $40\ \text{K}$). Rubín může vyrůstat v dobré optické kvalitě. Při pěstování se používá buď Čochralského nebo Verneuilovy metody. Koncentrace iontů chromu Cr^{3+} v safíru se pohybuje v rozmezí od $0,05$ do $0,5\%$ ($0,05\%$ odpovídá $1,6 \cdot 10^{19}$ iontů chromu v cm^3). Množství aktivních iontů udává barvu rubínu, která může být od bledě růžové až do tmavě červené. Energetické hladiny iontu chromu v safíru se značně liší od hladin energií ve volných atomech. Změna nastává důsledkem silné vzájemné interakce elektronové slupky 3d skupiny železa, k níž patří i chrom s krystalickým polem mřížky safíru. Nastává rozštěpení základního stavu ${}^4F_{3/2}$ na řadu úrovní (obr. 9.5).

Základním stavem spektra energetických hladin je stav 4A_2 , odkud jsou

Obr. 9.5: Energetické hladiny iontu chromu Cr^{3+} v rubínu

elektrony čerpány do pásů 4F_2 a 4F_1 širokých přibližně 100 nm a umístěných v zelené a modré oblasti spektra. Doba života v čerpacích pásech je extrémně krátká a ionty se vracejí do metastabilní hladiny \bar{E} . Ta je rozštěpena na dvě podhladiný se vzdáleností 29 cm^{-1} . Horní $2\bar{A}$ a dolní \bar{E} . Přechody z těchto hladin na základní hladinu se nazývají R_1 a R_2 čáry. Každá z těchto čar je při pokojové teplotě široká $\approx 0,5 \text{ nm}$ a obě jsou na konci viditelného pásma v červené oblasti ($\lambda_1 = 694,3 \text{ nm}$ (R_1) a $\lambda_2 = 692,9 \text{ nm}$ (R_2)). Při tepelné rovnováze je poměr obsazení N těchto hladin roven:

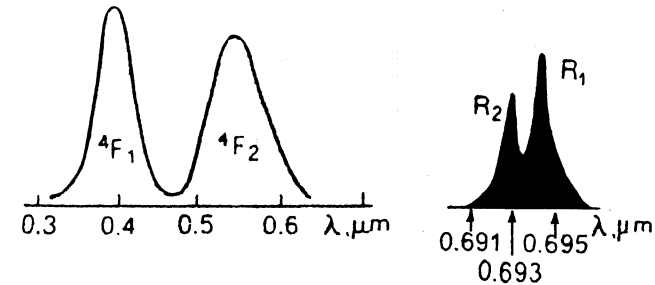
$$\frac{N(2A)}{N(E)} = 0,87. \quad (9.1)$$

Fluorescence rubínu obsahuje obě čáry R_1 i R_2 (viz obr. 9.6). Laserovým přechodem je pouze čára R_1 tj. přechod mezi hladinami \bar{E} a 4A_2 . Je to proto, že laserová čára R_1 dosahuje dříve prahu generace než čára R_2 . Vlastnosti rubínu jsou shrnuty v tab. 9.1 ve srovnání s materiály $Nd:YAG$ a $Nd:sklo$. Energetické schéma rubínu odpovídá tříhladinovému schématu.

Tabulka 9.1: Parametry rubínového, $Nd:YAG$ a $Nd:sklo$ laserového aktivního materiálu

Parametr	Rozměr	Rubín	$Nd:YAG$	$Nd:sklo$
Vlnová délka	μm	0,6943	1,0641	1,0623
Energie fotonu	J	$2,86 \cdot 10^{-19}$	$1,86 \cdot 10^{-19}$	$1,86 \cdot 10^{-19}$
Spontánní doba života	μs	3000	240	300
Fluorescenční šířka čáry	nm	0,55	0,40	26
Teplotní vodivost	$\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,42	0,14	0,012

V absorpčním spektru (viz obr. 9.6) jsou zřejmá dvě maxima odpovídající přechodům na hladiny 4F_1 a 4F_2 ležících v modré (max pro $\lambda = 0,41 \mu\text{m}$) a žlutozelené (max pro $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$) oblasti spektra. Každé z těchto pásem je široké $0,1 \mu\text{m}$. Pro optické čerpání tohoto laseru je používáno světlo xenonové impulsní výbojky.



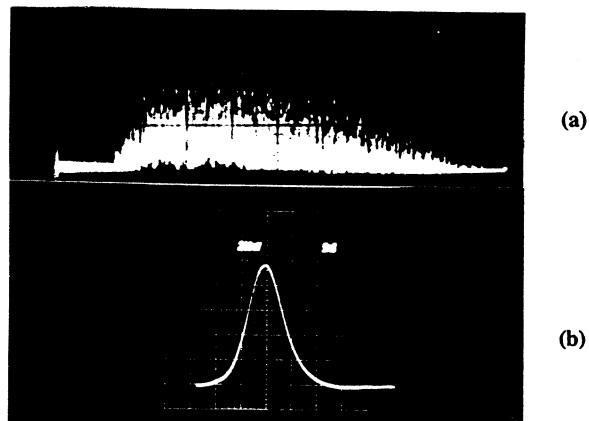
Obr. 9.6: Spektra iontu chromu v rubínu

a) absorpční; b) fluorescenční

Otevřený rezonátor rubínového laseru je tvořen zpravidla totálně odraz-

ným dielektrickým zrcadlem nebo střešovým křemenným hranolem. Výstupní zrcadlo tvoří v nejjednodušším případě kolmé čelo rubínového krystalu s reflexí $R = 8\%$ nebo planparalelní deska ze skla BK7 s reflexí 16%. Ve složitějších systémech je použito dielektrického zrcadla s reflexí 20 až 50%.

Rubínový laser je používán většinou v impulsním režimu, protože pro kontinuální režim není možné rubín dostatečně ochladit. Při volně běžícím režimu rubínový laser generuje impulsy s energií až 5 J, s délkou impulsu $\tau = 1 \cdot 10^{-3}$ s (viz obr. 9.7a) a divergencí 3 mrad. V případě činnosti laseru v Q-spínaném režimu jsou generovány impulsy s energií 1 až 2 J a s délkou impulsu 10^{-8} až 10^{-9} s (obr.9.7b).



Obr. 9.7: Časový rozvoj impulsu rubínového laseru
a) pracujícího ve volně běžícím režimu, b) gigantického

Generovaná vlnová délka rubínového laseru $\lambda = 0,6943 \mu\text{m}$ a jeho vlastnosti umožňují použití tohoto laseru v průmyslu k vrtání tvrdých materiálů,

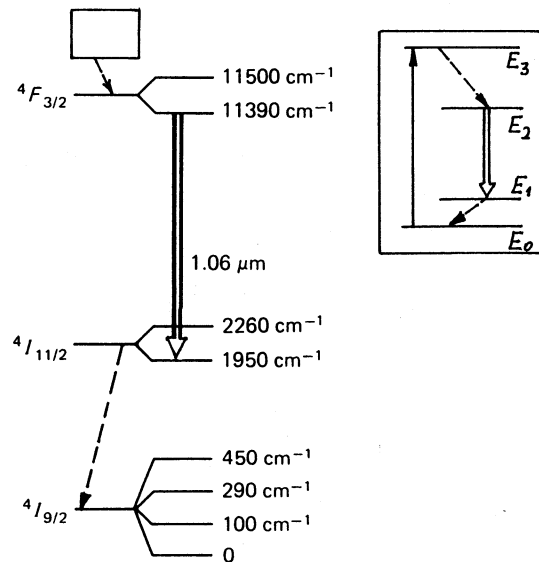
v lékařství (dermatologii), v laserové lokaci družic atd. V mnoha oborech byl v poslední době nahrazen jinými druhy laserů, především *Nd:YAG* laserem.

9.3.2 Neodymový laser

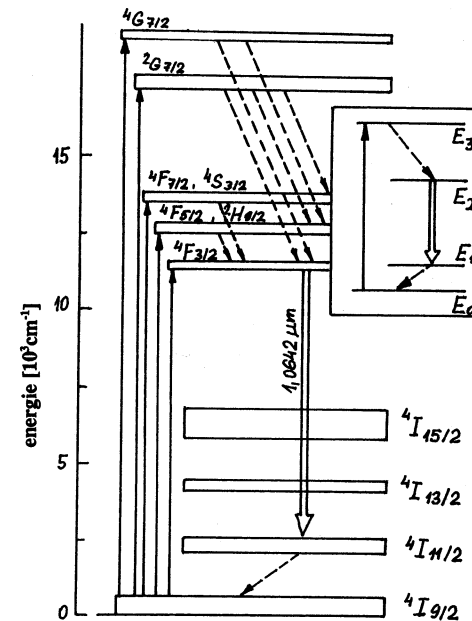
Matricí v tomto materiálu je sklo. To se odlišuje od ostatních matric hlavně tím, že je to materiál izotropní. Může být dopován s velmi vysokou koncentrací až 5% Nd_2O_3 s výbornou homogenitou a lze vyrobit velké rozměry v dobré optické kvalitě. Skleněné laserové tyče dopované neodymem byly vyrobeny v různých rozměrech a velikostech od vláken s průměrem několika mikrometrů až po tyče s průměrem 7,5 cm a dlouhé 2 m a disky o průměru 90 cm a 5 cm tlusté.

Existuje velké množství druhů skel dopovaných neodymovými ionty. Dobré optické, mechanické a chemické vlastnosti mají skla silikátová (SiO_2) a fosfátová (P_2O_5) výrobců Kigre, Hoya, Shott.

Mezi sklem a krystalovým aktivním materiálem existují dva hlavní rozdíly. První je teplotní vodivost, která je u skla značně menší než u většiny ostatních matric. Druhý rozdíl je v tom, že emisní čáry neodymu ve sklech jsou širší než v krystalech. Širší čára nabízí možnost zesílení a generace kratších světelných impulsů a dovoluje nahromadění velkého množství energie v zesilovacím mediu. Na obr. 9.8 je zjednodušené spektrum energetických hladin iontu neodymu ve skle. Podobně jako u dalšího materiálu *Nd:YAG* je toto schéma čtyřhladinové. Horní laserová hladina je složena ze dvou hladin úroveň $^4F_{3/2}$. Spontánní doba života této hladiny je několik stovek mikrosekund. Spodní hladina laserového přechodu je úroveň $^4I_{11/2}$. Tato hladina je spontánně a nezářivě vyprazdňována přechodem na základní stav $^4I_{9/2}$. Doba života hladiny $^4I_{11/2}$ leží v oblasti 10 až 100 ns. Vlnová délka laserového záření závisí na druhu skla. Pro matrice z fosfátových skel je $\lambda = 1,053$ až $1,054 \mu\text{m}$, pro silikátová skla $\lambda = 1,061$ až $1,062 \mu\text{m}$. *Nd:sklo* laser pracuje tak jako laser rubínový zpravidla v impulsním režimu. Generovaná energie závisí na velikosti aktivního prostředí a může dosáhnout až 20 J v impulsu o délce $100 \cdot 10^{-6}$ s.

Obr. 9.8: Spektrum energetických hladin iontu Nd ve skle

V Q-spínaném režimu jsou generovány impulsy s energií 2 až 5 J s délkou impulsu 10 až $30 \cdot 10^{-9}$ s. Laserové systémy s aktivním prostředím Nd :sklo se při použití doplňují se systémy Nd :YAG. Pro kontinuální a velmi vysoké opakovací frekvence se využívá velkého zisku a teplotní vodivosti krystalových Nd :YAG laserů. Nd :sklo lasery jsou vhodné pro vysoko-energetické pulsní režimy práce s malou opakovací frekvencí, např. pro velké termonukleární systémy.



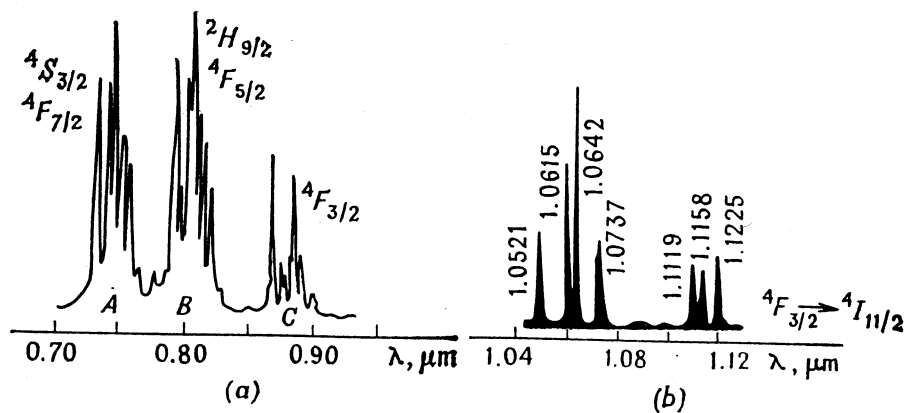
Obr. 9.9: Spektrum energetických hladin neodymu v krystalu YAG

9.3.3 Nd :YAG laser

Nd :YAG je dnes nejvíce používaný typ pevnolátkového laseru. Aktivním materiálem je izotropní krystal yttrium aluminium granátu dopovaný neodymem. Schematické znázornění atomových hladin iontu neodymu v matici yttrium aluminium granátu je na obr. 9.9

Optické čerpání převádí atomy neodymu ze základní hladiny $4I_{9/2}$ na několik hladin označených výrazy $4G_{7/2}$, $2G_{7/2}$, $4S_{3/2} + F_{7/2}$, $4F_{5/2} + 2H_{9/2}$ a $4F_{3/2}$. Těchto pět skupin znamená pět pásmů v absorpčním spektru Nd :YAG krystalu (obr. 9.10a)). Je vidět, že pásma mají jemnou strukturu, která odráží tu skutečnost, že čerpací energetické pásy mají vnitřní individuální hladiny. Horní laserovou hladinou je $4F_{3/2}$. Emise záření nastává při přechodech neodymových iontů z této hladiny na hladiny $4I_{11/2}$, $4I_{9/2}$, $4I_{13/2}$ a $4I_{15/2}$. Protože každý z těchto

označených pásů je složen z několika hladin, celkový počet laserových přechodů je velký (viz tab. 9.2). Hlavní část energie ($\approx 60\%$) je emitována na přechodu ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$, a proto hladina ${}^4I_{11/2}$ je obvykle definována jako dolní laserová hladina *Nd:YAG* laseru. Na obr.9.10b) je uvedeno fluorescenční spektrum *Nd:YAG* krystalu pro přechody mezi hladinami ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$. Spektrum obsahuje sedm čar. Nejzajímavější čára leží v blízké infračervené oblasti (1,0615 a 1,0642 μm). Přechody ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ dávají vznik záření na vlnové délce 1,3 μm a ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ 0,9 μm . Je zřejmé, že energetické spektrum hladin *Nd:YAG* laseru odpovídá čtyřhladinovému modelu.



Obr. 9.10: Spektra iontu neodymu v krystalu YAG

a) absorpční, b) fluorescenční.

Teplná vodivost granátu dovoluje účinné chlazení aktivního materiálu, a proto lze tento laser provozovat jak v impulsním, tak i v kontinuálním režimu. Při kontinuálním provozu je *Nd:YAG* laser buzen kontinuálně-hořícími kryptonovými výbojkami a může dosahovat výkonů 100 až 200 W. Pro impulsní

buzení se do krystalové mřížky yttrium aluminium granátu přidává další dopující prvek – ionty chromu Cr^{3+} . Potom lze použít pro buzení xenonové výbojky. Excitované ionty chromu předávají svoji energii iontům neodymu a zvyšují účinek buzení xenonové výbojky. Energie dosahované ve volně běžícím režimu jsou až 5 J, při délce impulsu $100 \cdot 10^{-6}$ s a opakovací frekvenci až 100 Hz. Účinnost *Nd:YAG* laseru dosahuje až několika procent.

Nd:YAG laser našel velké uplatnění v průmyslových aplikacích (vrtání, sváření, řezání, žihání materiálu), v lékařství se používá kontinuální *Nd:YAG* skalpel v chirurgii a pulsní *Nd:YAG* laser v oční mikrochirurgii [15]. Dále se *Nd:YAG* laser uplatnil v radarové a lidarové technice, ve spektroskopii a jako zdroj koherentního záření v nelineární optice.

9.3.4 *Nd:YLF* laser

Matricí materiálu *Nd:YLF* je materiál lithium-yttrium-fluorid LiYF_4 . Laserový přechod je na vlnové délce 1053 nm, což odpovídá vlnové délce Nd skleněného laseru s matricí z fosfátového skla. *Nd:YLF* laser se proto často používá jako oscilátor generující vzhledem ke své široké emisní čáře krátké impulsy, zesilované v dalším stupni Nd:sklo laseru. Na obr. 9.11 je zjednodušené energetické schéma hladin neodym v matrici *Nd:YLF* krystalu. Podle polarizace jsou generovány vždy dvě laserové čáry kolem 1,05 μm a 1,3 μm . Horní laserovou hladinou je úroveň ${}^4F_{3/2}$, dolní ${}^4F_{13/2}$ nebo ${}^4I_{11/2}$. Je-li v rezonátoru umístěn uvnitř polarizátor je generována vlnová délka buď 1047 nm nebo 1053 nm. Totéž pro vlnové délky kolem 1,3 μm . Je generována buď vlnová délka 1,321 nebo 1,313 μm .

Materiálové vlastnosti krystalu *Nd:YLF* jsou uvedeny v tab.: 9.3 Relativně velká teplotní vodivost dovoluje účinnou extrakci tepla a přirozený dvojlom eliminuje termální depolarizaci, což je problém, který nastává v izotropních matricích YAG krystalu. Příčný průřez krystalu YLF je 2x nižší než krystalu YAG. *Nd:YLF* laserový krystal se používá dnes v průmyslových aplikacích i v medicíně.

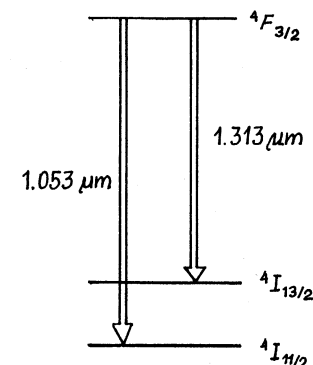
Tabulka 9.2: Vybrané kvantové přechody v krystalu Nd:YAG za pokojové teploty

Přechod	Luminiscenční čára vlnová délka [μm]	Relativní intenzita přechodu [%]
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0.8910	25
	0.8999	
	0.9385	
	0.9460	
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1.0521	60
	1.0615	
	1.0642	
	1.0737	
	1.1119	
	1.1158	
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1.1225	14
	1.3184	
	1.3331	
	1.3351	
	1.3381	
	1.3533	
	1.3572	
	1.4150	
1.4444		
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1.833	1

9.3.5 Alexandrit

Přírodní alexandritový krystal byl poprvé nalezen na Urale v roce 1880 a byl nazván podle cara Alexandra II. Syntetický alexandrit použitý jako aktivní materiál pevnolátkového laseru byl široce přeladitelným výbojkově čerpaným laserem pracujícím při pokojové teplotě. První práce s tímto materiálem byly provedeny firmou Allied Corp. USA.

Chemicky je alexandrit krystalem chrysoberylu $BeAl_2O_4$ (matrice) dopovaným ionty Cr^{3+} (aktivátor). Koncentrace aktivních iontů může být 0,1



Obr. 9.11: Spektrum energetických hladin neodymu v matrici YLF

až 0,4 at.%. (Koncentrace 0,1 at.% představuje $3,51 \cdot 10^{19}$ iontů chromu v cm^3). Alexandrit je opticky a mechanicky velmi podobný krystalu rubínu. Také jako rubín může generovat záření na R čáře na vlnové délce $0,6804 \mu\text{m}$. V tom případě se tento systém chová jako tříhladinový [17], má vysoký práh generace záření, fixní generovanou délku a relativně velmi malou účinnost. Za určitých podmínek (s využitím vibračních přechodů) může dojít ke stimulovaným přechodům ve vibračním fluorescenčním pásmu mezi $0,7$ a $0,824 \mu\text{m}$. V tomto případě se systém chová jako čtyřhladinový.

Matrice alexandritu — *chrysoberyl* je iontový krystal s vlastnostmi velmi podobnými safíru (Al_2O_3) tvořícímu matrici pro krystal rubínu. Nedopovaný chrysoberyl je bezbarvý a průsvitný, po dodání Cr se stává růžovým podobně jako rubín. Jeho velká tvrdost, chemická stabilita a velká teplotní vodivost ($2/3$ hodnoty vodivosti rubínu a dvojnásobek hodnoty vodivosti krystalu YAG) umožňuje budít alexandritový krystal velkými středními výkony bez jeho termálního poškození. (Alexandrit má hodnotu termálního poškození 5krát vyšší než YAG a o 40% nižší než rubín. Vypočtená hodnota prahového absorbovaného výkonu nutného pro poškození krystalu je $0,6 \text{ kWcm}^{-1}$ délky krystalu).

Alexandrit krystalizuje v ortorombické struktuře a je to krystal dvouosý s

Tabulka 9.3: Vlastnosti krystalu $Nd:YLF$

Vzorec	$Nd:LiYF_4$
Vlnová délka [μm]	1,053
Index lomu (pro $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$)	
řádný n_o	1,4481
mimořádný n_e	1,4704
Doba života na hladině [μs]	520
Hustota [gcm^{-3}]	3,99
Tvrdoost (Mohs. stupnice)	4 až 5
Teplotní vodivost [$\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	0,06
Součinitel teplotní roztažnosti [10^{-6}K^{-1}]	13 (osa a) 8 (osa c)
Bod tání [$^{\circ}\text{C}$]	825

hlavními osami indexového elipsoidu směřovanými podél krystalografických os. Nízká symetrie tohoto krystalu znamená anisotropii jeho fyzikálních vlastností. Je-li zkoumán v polarizovaném světle, má různou barvu v závislosti na polarizaci světla vzhledem ke krystalové ose. Také indexy lomu pro světlo polarizované podél tří krystalových os se liší (viz tab.: 9.4).

Jak již bylo uvedeno výše, alexandrit může generovat záření jako čtyřhladinový vibrační laser nebo jako tříhladinový. Zjednodušené energetické schéma alexandritu je uvedeno na obr. 9.12. Základní hladinou je hladina 4A_2 . Hladiny 4T_2 a 4T_1 jsou absorpčními hladinami. R čára je emitována z hladiny 2E (doba života 1,54 μs). Vibrační přechody jsou způsobeny emisí z hladiny 4T_2 (doba života 6,6 μs) na excitované vibrační stavy uvnitř hladiny 4A_2 .

V současné době je alexandritový krystal pěstován Čochralského metodou. Tab.: 9.4 shrnuje jeho fyzikální, mechanické a optické vlastnosti.

Alexandritový laser může pracovat jak v kontinuálním, tak i v impulsním

Tabulka 9.4: Vlastnosti krystalu alexandritu

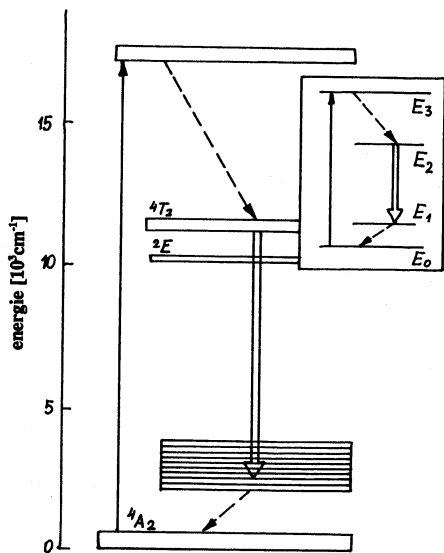
Vzorec	$Cr:BeAl_2O_4$
Vlnová délka [nm]	700 až 818
index lomu (pro $\lambda = 7520 \text{ nm}$)	$E//a$ 1,7367 $E//b$ 1,7421 $E//c$ 1,7346
Doba života na hladině [μs]	260
Fluorescenční šířka čáry [nm]	100
Tvrdoost	2000
Teplotní vodivost [$\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	0,23
Součinitel teplotní roztažnosti [10^{-6}K^{-1}]	//a 5,9 //b 6,1 //c 6,7
Bod tání [$^{\circ}\text{C}$]	1870

režimu. Při výbojkovém buzení byla dosažena opakovací frekvence 250 Hz. V Q-spínaném režimu byla generována výstupní energie 1 J. V kontinuálním režimu je alexandrit možno čerpat kryptonovými výbojkami stejně jako $Nd:YAG$ laser. Při tomto buzení bylo dosaženo výkonu 50 W. Celková účinnost alexandritového laseru je 2,5% pro volně běžící a 0,5 až 1% pro Q-spínaný režim.

Z hlediska využití se alexandritové lasery začínají prosazovat v lékařských aplikacích (dermatologie, fotodynamická terapie), v průmyslu a ve spektroskopii.

9.3.6 $Ho/CTH:YAG$

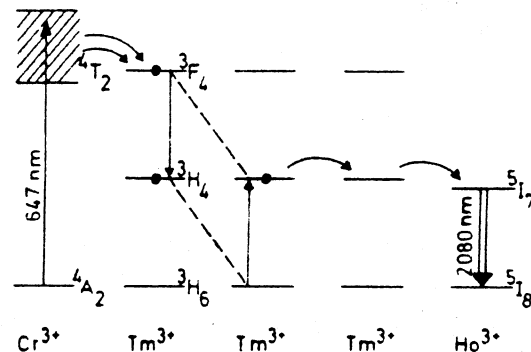
Generace laserového záření na vlnové délce $\lambda = 2,1 \mu\text{m}$ na iontu holmia zabudovaného do matrice yttrium aluminium granátu byla poprvé dosažena v AT&T Bellových laboratořích v roce 1962. Atomy holmia mají jen několik slabých absorpčních čar na vlnových délkách produkovaných výbojkovým čerpáním, a proto byly do matrice yttrium-aluminium-granátu ($Y_3Al_5O_{12}$ -YAG)

Obr. 9.12: Spektrum energetických hladin iontu Cr v alexandritu

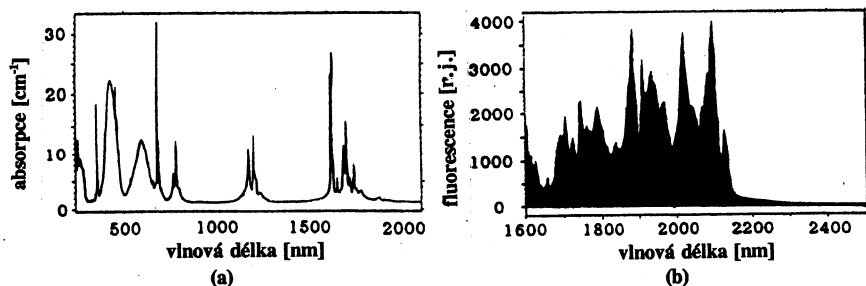
dodány postupně další ionty vzácných zemin - erbia (Er) a thulia (Tm), které přenášejí absorbovanou výbojkovou energii na ionty holmia. Nový laserový materiál se nazýval $Er, Tm, Ho:YAG$ nebo $\alpha Ho:YAG$. Výsledky generace záření s tímto materiálem byly zajímavé, ale $\alpha Ho:YAG$ krystal laseroval pouze při teplotách 80 K.

Další výzkum holmiového laseru byl motivován rozvíjejícími se aplikacemi laserů v medicíně. Významného kroku bylo dosaženo v roce 1985, kdy byl iont erbia Er^{3+} v $\alpha Ho:YAG$ krystalu nahrazen iontem chromu Cr^{3+} . Použitím iontů Cr^{3+} , které senzibilizují ionty Tm^{3+} , bylo dosaženo relativně nízkého prahu a účinné generace záření při pokojové teplotě. Nový krystal $Cr, Tm, Ho:YAG$ byl označen jako CTH:YAG. Přítomností atomů chromu byla zvýšena účinnost přenosu záření z xenonové výbojky na ionty Ho^{3+} . Ionty chromu Cr^{3+} absorbují záření v široké spektrální oblasti. Po nezářivých přechodech uvnitř a mezi stavy $⁴T_2$ a $²E$ je excitace přenesena dipól-dipolovou interakcí

z iontů Cr^{3+} na $³F_3$ a $³H_4$ stav iontu Tm^{3+} . (Obr. 9.13). Nezářivý spád z hladiny $³F_3$ umísťuje všechny excitované Tm^{3+} ionty do stavu $³H_4$. Každý excitovaný iont Tm^{3+} potom interaguje kros-relaxačními procesy se základním stavem, což způsobuje vznik dvou Tm^{3+} iontů ve stavu $³F_4$. A konečně, tyto Tm^{3+} ionty přenášejí svoji energii na dva ionty holmia Ho^{3+} , které obsazují horní laserovou hladinu $⁵I_7$. Laserový přechod ($2,09 \mu m$) potom probíhá mezi hladinami $⁵I_7$ na $⁵I_8$.

Obr. 9.13: Spektrum energetických hladin iontů Cr, Tm a Ho v matici YAG

Široké absorpční spektrum CTH:YAG krystalu (200 až 1700 nm) s maximem na vlnové délce 647 nm (obr. 9.14a)) umožňuje použití nekoherentního i koherentního čerpání. CTH:YAG krystal lze čerpat světlem xenonové výbojky, nebo koherentním zářením kryptonového, argonového, barvivového nebo polovodičového laseru. Absorpční příčný průřez pro vlnovou délku $\lambda = 2,091 \mu m$ je $9 \cdot 10^{-21} \text{ cm}^2$, naměřená doba života metastabilní hladiny $Tm \ ^3H_4$ a $Ho \ ^5I_7$ je 7,8 ms. Fluorescenční spektrum $Cr, Tm, Ho:YAG$ krystalu je na obr. 9.14b). Při pokojové teplotě CTH:YAG laser generuje záření převážně na vlnové délce $2,0963 \mu m$. V dispersním rezonátoru je možné pozorovat generaci na 9 vlnových délkách uvnitř oblasti $2,1275 \mu m$ až po $2,0803 \mu m$.



Obr. 9.14: Spektra CTH:YAG krystalu

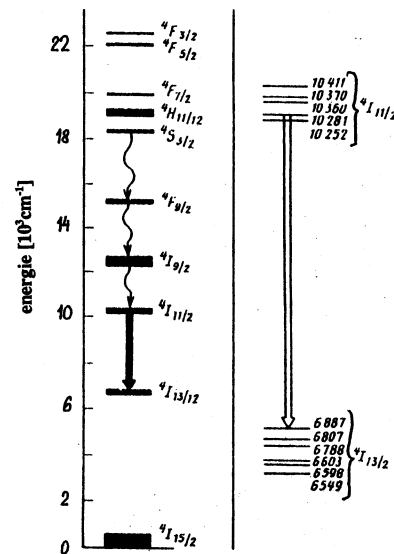
a) absorpční; b) fluorescenční

Vlnová délka CTH:YAG laseru spadá do oblasti poměrně velké absorpce tohoto záření ve vodě, zároveň je to ještě vlnová délka, kterou lze přenášet křemennými typy vláken. Tyto dvě okolnosti dělají z CTH:YAG laseru unikátní systém vhodný pro použití především v medicíně.

9.3.7 Er:YAG

Absorpční a fluorescenční vlastnosti iontu erbia byly zkoumány v různých maticích, aby byly určeny vlastnosti erbia jako aktivního iontu umožňujícího laserovou akci. Materiál matrice pro Er iont dnes tvoří převážně YAG (yttrium-aluminium-garnet), YLF, $YAlO_3$ a různá skla. Jako pokusné byly zkoušeny i matrice LaF_3 , $CaWO_4$ a CaF_2 . Terminální hladina iontu Er^{3+} je mezi 525 cm^{-1} pro Er:YAG a 50 cm^{-1} pro Er:sklo. Dominantními vlnovými délkami generovaného záření jsou $2,94\text{ }\mu\text{m}$ a $1,56\text{ }\mu\text{m}$ pro YAG:Er³⁺. Tyto vlnové délky odpovídají přechodům mezi stavy $^4I_{13/2}$ a základním stavem $^4I_{15/2}$ erbia ($1,53$ až $1,66\text{ }\mu\text{m}$) a $^4I_{11/2}$ na $^4I_{13/2}$ ($2,6$ až $2,9\text{ }\mu\text{m}$). Spektrum energetických hladin iontu erbia v matici yttrium aluminium granátu je uvedeno

na obr. 9.15. Rovněž jako v případě holmiového Ho^{3+} iontu i Er^{3+} iont je čerpán v případě výbojkového buzení pomocí iontů Cr^{3+} působících jako senzibilizátor.



Obr. 9.15: Spektrum energetických hladin iontu erbia v krystalu YAG

Všechny vlnové délky generované Er:YAG laserem jsou mimořádně zajímavé pro některé aplikace. Na vlnové délce $2,94\text{ }\mu\text{m}$ je absorpční maximum vody, což je důležité především pro aplikace v medicíně. Absorpční koeficient pro záření YAG:Er³⁺ laseru v tkáni je vyšší než pro ostatní měřené vlnové délky, hloubka průniku do tkáně je 2 mm, přičemž na rozdíl od UV záření excimerového laseru, záření o vlnové délce $2,94\text{ }\mu\text{m}$ nemá žádné vedlejší účinky na lidský organismus. Stimulovaná emise v okolí vlnové délky $1,6\text{ }\mu\text{m}$ je zajímavá z hlediska omezené možnosti poškození oční tkáně touto vlnovou délkou. Rovněž pro určité způsoby opracování materiálů je tato vlnová délka vhodnější. Záření Er:YAG laseru $1,56\text{ }\mu\text{m}$ se používá v laserových dálkoměrech.

Příklady ke kapitole 9:

- 9.1 Práh destrukce rubínového krystalu je roven 20 J cm^{-2} . a) Jaká je maximální hustota inverzní populace, kterou lze vytvořit v aktivním prostředí s průměrem $0,5 \text{ cm}$ a délkou 7 cm tak, aby se krystal nezničil? b) Může být tento krystal zničen vlastním zářením, jestliže je koncentrace aktivních částic rovna $1,6 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$? c) Najděte maximální přípustnou délku tohoto krystalu, kdy se ještě nezničí vlastním zářením.
- 9.2 Odhadněte, jaký výkon musí mít výbojka, aby bylo dosaženo prahu generace v kontinuálním režimu u *Nd*:sklo laseru. Doba života horní laserové úrovně je $0,5 \mu\text{s}$, prahová inverzní populace je 10^{16} cm^{-3} , objem krystalu je 10 cm^3 . Účinnost přeměny elektrické energie lampy v energii pohlcovanou absorpčním spektrem *Nd*³⁺ se rovná 4%.
- 9.3 Určete velikost energie nutné k dosažení generace v *Nd*:YAG laseru, který pracuje v impulsním režimu, za předpokladu, že délka rezonátoru se rovná 20 cm , ztráty za jeden průchod se rovnají 4%, doba života fotonu v rezonátoru se rovná $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$, index lomu krystalu je $1,5$, doba života horní laserové úrovně je $5,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ a šířka pásma zesílení je rovna 6 cm^{-1} .
- 9.4 Odhadněte výkon výbojky nutný pro provoz *Nd*:YAG laseru s parametry danými v příkladu 9.3 a průměrem krystalu $0,25 \text{ cm}$ a délkou 3 cm .
- 9.5 Odhadněte minimální výkon buzení, při kterém je zajištěna činnost laseru s *Nd*:sklem laseru v kontinuálním režimu s následujícími parametry: $\Delta\nu = 200 \text{ cm}^{-1}$, index lomu krystalu $1,5$, doba života horní laserové úrovně $3 \cdot 10^{-4} \text{ s}$, délka rezonátoru 20 cm , ztráty za jeden průchod 2%, doba života fotonu v rezonátoru $3,3 \cdot 10^{-8} \text{ s}$.

Kapitola 10

Kapalinové lasery

10.1 Aktivní prostředí

Aktivním prostředím kapalinových laserů jsou roztoky *organických barviv* nebo speciálně připravené kapaliny dopované ionty vzácných zemin. Speciální kapaliny jsou zpravidla roztoky metalo-organických sloučenin, např. vodní roztoky solí s aktivními ionty *Gd*³⁺, *Eu*³⁺, *Tb*³⁺, *Nd*³⁺, *Er*³⁺ nebo *Ho*³⁺. Ve většině případů se kapalinové lasery objevují s aktivním prostředím tvořeným organickými barvivy.

Organická barviva tvoří velkou část aktivního prostředí kapalinových laserů. Aktivním prostředím jsou ionty organických barviv v různých kapalných rozpouštědlech, jakými jsou např. voda, etylalkohol, metylalkohol, toluen, benzen, aceton, cyklohexan, glycerin a další.

Organická barviva jsou komplexy organických sloučenin majících široká absorpční pásma ve viditelné a blízké ultrafialové oblasti spektra. Chemická struktura organických barviv je charakterizována kombinací několika benzenových, pyridinových, azinových, pyrolových a dalších chemických organických jader. Nejeftivnější luminiscenční barviva jsou rozdělena do osmi kategorií: xanteny, polymetiny, oxaziny, kumariny, antraceny, acridiny, aziny a ftalocyaniny. Do dnešní doby byla generace laserového záření ověřena u více než 200 různých barviv, pásma generovaných vlnových délek pokrývá oblast