

Lasery – zdroje koherentního záření

Helena Jelínková

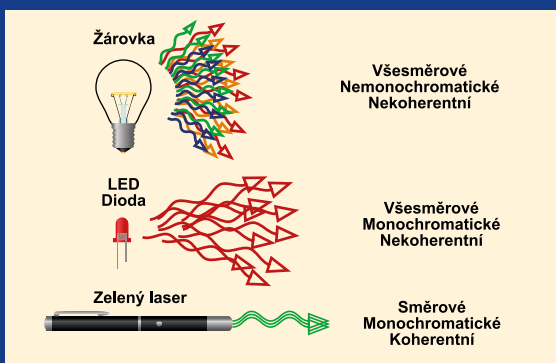
V květnu letošního roku si celý vědecko-technický svět připomínal padesát let od uvedení do provozu prvního laseru (16. květen 1960). Laserem generujícím „speciální“ elektromagnetické záření byl rubínový laser a vědcem, který poprvé uvedl takové zařízení v činnost, byl Theodor H. Maiman, pracovník Hughes Research Laboratories, USA. Slovo laser je akronym názvu **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, což v doslovném překladu znamená „zesílení světla stimulovanou emisí záření“.

Laser

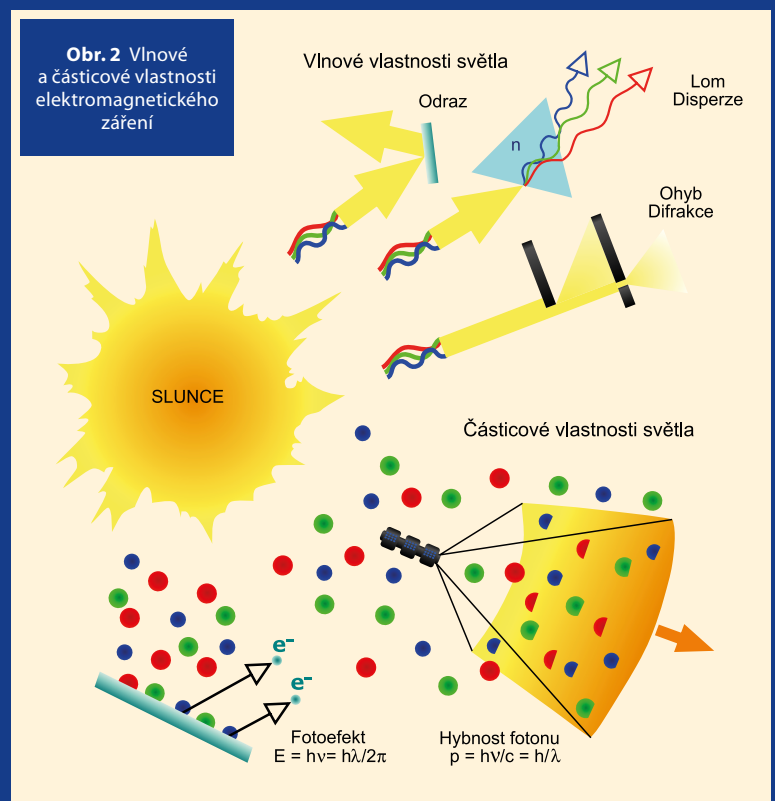
Laser je přístroj, který generuje elektromagnetické záření s unikátními vlastnostmi (obr. 1), jimiž jsou:

- monochromaticita
- směrovost
- koherence
- velký jas

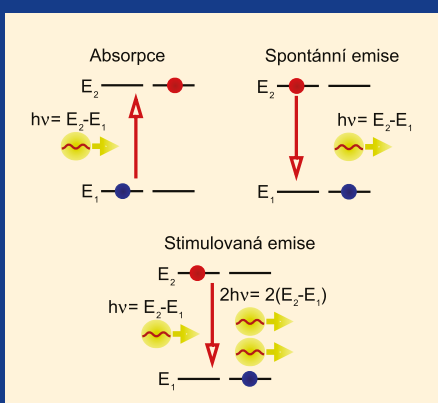
(jas $B = P/A \cdot \Omega$ [$\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$], P – výkon výstupního svazku záření, A – jeho příčný průřez, Ω – úhel divergence svazku).



Obr. 1 Srovnání vlastností nekoherentního a koherentního záření



Obr. 2 Vlnové a částicové vlastnosti elektromagnetického záření

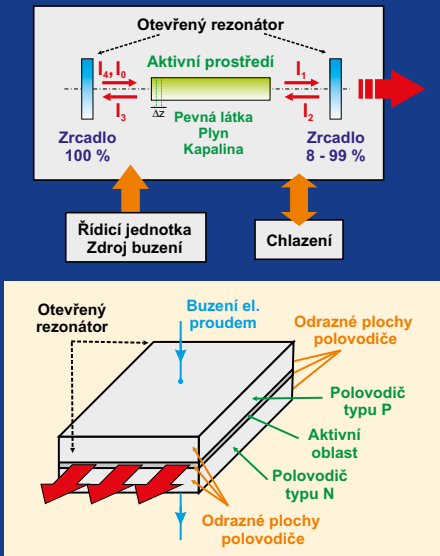


Obr. 3 Znárodnění dějů probíhajících při interakci elektromagnetického záření s kvantovou soustavou

Historie laseru

Historie laseru ale započala dříve než v roce 1960. Na přelomu devatenáctého a dvacátého století Max Planck z výsledků zkoumání „absolutně černého tělesa“ odvodil vztah mezi energií E a frekvencí záření ν : $E = h\nu$. Energie E může být emitována nebo absorbována pouze v diskretních objemech, které Planck nazval *kvanta*. (Konstanta úměrnosti h je Planckovou konstantou: $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js.) Potvrdil tím hypotézu dvojí povahy elektromagnetického záření tzv. *korpuskulárně-vlnový dualismus* (obr. 2).

Na Planckův výzkum navázal Albert Einstein (1905) studií tzv. *fotoelektrického efektu* – energie světla je přenášena v diskretních kvantových částicích nazývaných *fotony*. V roce 1915 Niels Bohr uveřejnil tzv. „General assumptions“, kde shrnul výsledky týkající se studia atomu. Definoval tzv. „stacionární stavy“ s danou energií. Emise nebo absorpce elektromagnetického záření může existovat pouze ve spojitosti s přechodem mezi těmito stacionárními stavy kvantové soustavy. Frekvence v emitovaného nebo absorbovaného záření je úměrná rozdílu energií E_2 a E_1 těchto stacionárních stavů: $\nu = (E_2 - E_1) / h$.



Obr. 4 Schematické znázornění součástí laserového oscilátoru (nahore) pevnolátkový, plynový a kapalinový laser; (dole) polovodičový laser

Při interakci kvantové soustavy (souboru atomů nebo molekul) s elektromagnetickým polem může tedy dojít k **absorpci** kvanta záření (soustava se nachází v nestabilním – excitovaném – stavu) nebo k tzv. **spontánní emisi** kvanta záření – k **vyzáření** přebytečného fotonu při návratu soustavy do stabilního stavu (obr. 3). Vyzářený foton má energii, která je rovna rozdílu energií $E_2 - E_1$ daného přechodu, ale směr pohybu fotonu a jeho další vlastnosti vlnové (polarizace nebo fáze) jsou naprosto náhodné.

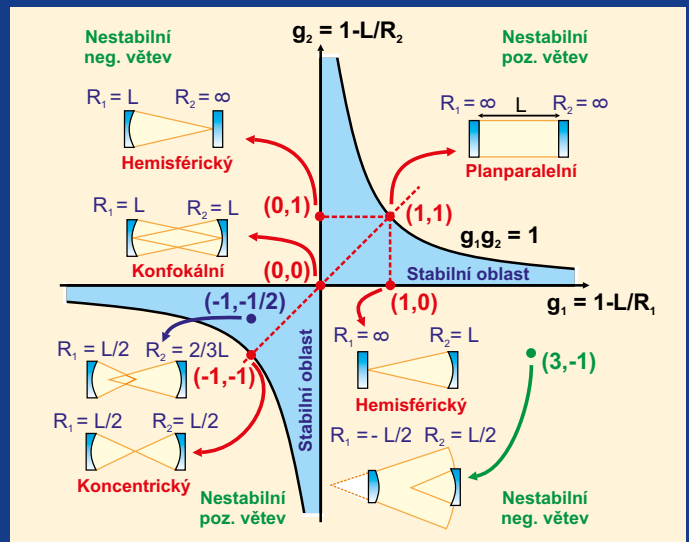
V roce 1916 vyslovil Einstein hypotézu: při přechodu z vyšší energetické hladiny na nižší může kromě emise *spontánní* existovat také **emise vynucená, indukovaná, stimulovaná** (obr. 3), která nastává tehdy, kdy spontánní foton způsobí přechod další kvantové soustavy z excitovaného na základní stav. Nový emitovaný foton má nejenom stejnou energii (a tedy i vlnovou délku) jako foton „stimulující“ (záření bude *monochromatické*), ale bude se také pohybovat ve stejném směru (záření bude *směrové*) a – z hlediska vlnových vlastností – se stejnou fází (záření bude *koherentní*).

Tato emise je základem funkce jak maseru (mikrovlnný předchůdce laseru), tak samotného laseru. Trvalo ovšem více než čtyřicet let, než vědci byli schopni zesílit tuto emisi natolik, aby byla měřitelná a aby tak Einsteinova hypotéza byla potvrzena.

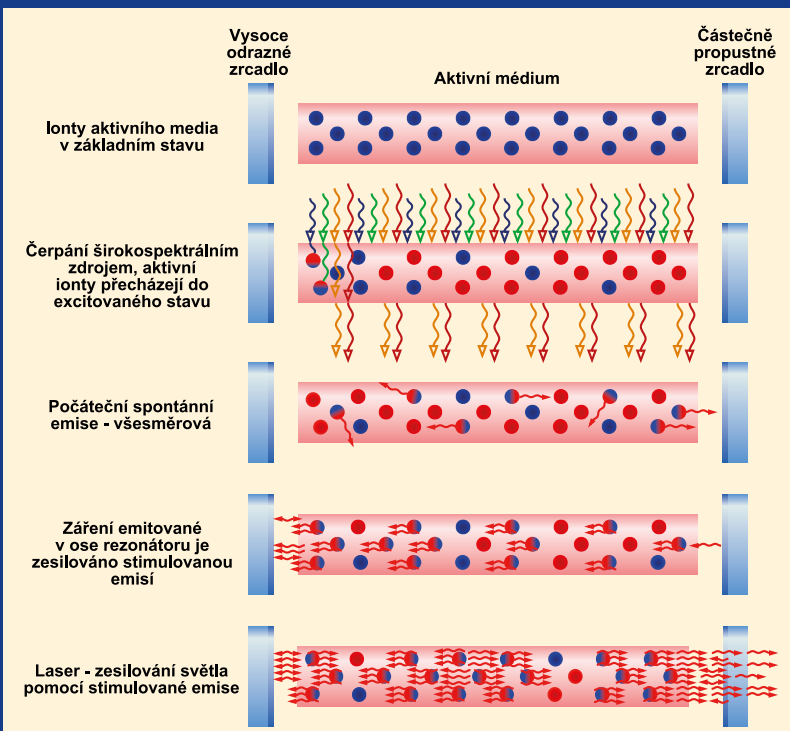
Komponenty laseru

Laserový oscilátor se v základě skládá ze tří částí (obr. 4), kterými jsou:

- **aktivní prostředí** (krystal, plyn, barvivo, polovodič, plazma) – zdroj kvantových soustav;
- **čerpací zdroj** (záblesk světla, elektrický výboj, elektronový svazek atp.) dodávající energii laserovému aktivnímu mediu, umožňující dosažení inverzního obsazení hladin;
- **optický rezonátor** – soustava dvou nebo více odrazných zrcadel vnáší kladnou zpětnou vazbu, jíž lze dosáhnout optického zesílení (různé typy rezonátorů jsou na obr. 5).



Obr. 5 Příklady laserových rezonátorů; elektromagnetické pole uvnitř rezonátoru má tvar daný parametry zrcadel rezonátoru



Obr. 6 Vznik laserového záření uvnitř otevřeného rezonátoru

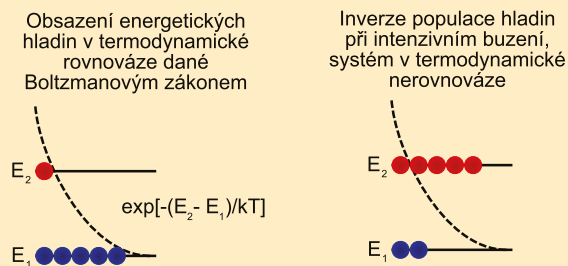
Vznik laserového záření

Vznik laserového záření je graficky znázorněn na obr. 6. Působením čerpacího záření přecházejí atomy (molekuly) aktivního laserového materiálu do excitovaného stavu a některé z nich se vrací do stavu základního za současného vyzáření spontánního fotonu. Ten může splnit úlohu stimulujícího fotonu, způsobujícího vynucený přechod další excitované kvantové soustavy (atomu, molekuly) do základního stavu za současného vyzáření kvanta – stimulovaného fotonu. Při šíření těchto dvou fotonů aktivním prostředím nastává lavinovitý proces, počet stimulovaných fotonů se zvyšuje. Zároveň dochází k výběru směru dráhy, po které se fotony v rezonátoru pohybují. Fotony pohybující se jinými směry, než je směr kolmý k zrcadlům rezonátoru, se nevrací do aktivního média a jejich počet se tedy nezvyšuje. Generované laserové záření, vznikající po mnoha obězích fotonů rezonátorem, vychází částečně propustným zrcadlem ven z rezonátoru a může být identifikováno přístroji. Z naměřené energie nebo výkonu a průřezu generovaného svazku lze určit intenzitu záření I .

Děje probíhající při generaci laserového záření

V procesu generace laserového záření jsou podstatné vždy dvě hladiny, nazývané *laserová* (horní) hladina (E_2) a *terminální* (dolní) hladina (E_1), mezi kterými dochází k laserovému přechodu. V počátečním stavu (před začátkem buzení) je obsazení (populace) energetických hladin aktivního média dáno termodynamickou rovnováhou, kterou lze popsat Boltzmannovým rozdělením $N_2 = N_1 \exp[-(E_2 - E_1)/kT]$, kde N_1 , N_2 jsou obsazení energetických hladin E_1 a E_2 , k je Boltzmannova konstanta ($k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$), T je absolutní teplota. Obsazení energeticky vyšších hladin se tedy exponenciálně zmenšuje (obr. 7). Z teorie vyplývá, že tzv. Einsteinovy koeficienty pravděpodobnosti absorpce a stimulované emise mezi dvěma energetickými hladinami se rovnají a že přírůstek (úbytek) intenzity záření způsobený stimulovanou emisí (absorpcí) je úměrný populaci té hladiny, ze které daný jev nastává. Pro dosažení narůstání počtu stimulovaných kvant v rezonátoru (stimulovaná emise převládá nad absorpcí) je nezbytné dosáhnout stavu, kdy je obsazení laserové hladiny větší než obsazení terminální hladiny, tzn. je nutné dosáhnout *inverze populace hladin* ($N_2 > N_1$) (obr. 7).

V reálném aktivním prostředí existuje obvykle velký počet energetických hladin, ale při základním, zjednodušeném popisu děje se omezujeme pouze na dvě hladiny. Je ale nutné mít na paměti, že dvouhladinový systém nemůže pracovat jako zesilo-

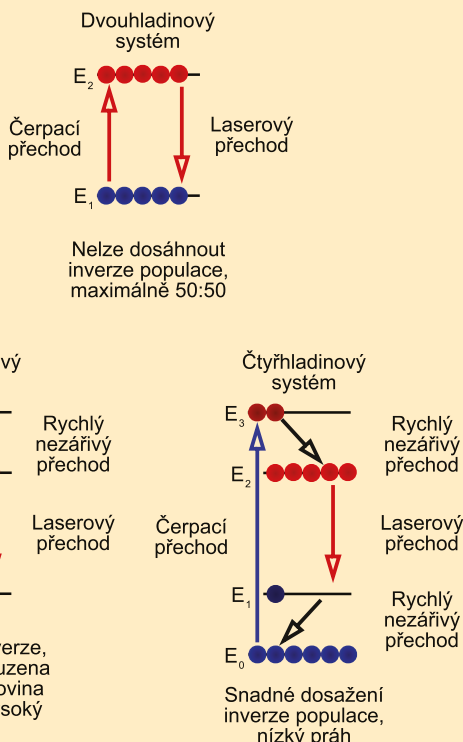


Obr. 7 Obsazení energetických hladin v termodynamické rovnováze a při inverzním obsazení

vač záření, protože u něho nelze čerpáním dosáhnout inverze populace hladin. Maximálně se ustaví rovnováha obsazení laserové a terminální hladiny (obr. 8). Popis reálného laserového děje (v nejjednodušším přiblížení) lze provést pomocí jednoho ze dvou modelů – tříhladinového nebo čtyřhladinového (obr. 8). U obou dochází k *laserovému přechodu* mezi hladinami E_2 a E_1 (jsou to tedy hladiny, které ve zjednodušeném modelu uvažujeme jako laserovou a terminální), ale čerpání probíhá mezi hladinami E_1 a E_3 (tříhladinový systém, např. rubínový laser) nebo E_0 a E_3 (čtyřhladinový systém, např. Nd:YAG laser) (obr. 8).

Při generaci laserového záření dochází v každé vrstvě aktivního prostředí o tloušťce Δz (viz obr. 4) k absorpci budícího záření, ke spontánní emisi a k zesílení rezonančního záření pomocí stimulované emise. V případě, že stimulovaná emise převyšuje podstatně spontánní emisi, může být spontánní emise zanedbána a intenzita I elektromagnetické vlny šířící se daným homogenním prostředím se vzdáleností z lze vyjádřit vztahem: $I = I_0 e^{(g-\alpha)z}$, kde I_0 je intenzita záření pro $z = 0$ a $g = \sigma(N_2 - N_1)$ je koeficient zesílení, σ je účinný průřez stimulované emise – materiálový parametr aktivního média, N_1 , N_2 jsou obsazení energetických hladin E_1 a E_2 , α je koeficient ztrát daný difrakčními ztrátami, nehomogenitami v aktivním prostředí a také „činnými“ ztrátami částečně propustným zrcadlem rezonátoru. Pro dosažení zesílení v laserovém rezonátoru musí platit: $I \geq I_0$, tzn. že po dvojnásobném průchodu záření rezonátorem (po odrazu od obou zrcadel, viz obr. 4), musí být intenzita $I_4 \geq I_0$, přičemž $I_4 = R_2 I_3 = R_1 R_2 I_0 e^{2(g-\alpha)L}$, kde $I_3 = I_2 e^{(g-\alpha)L} = R_1 I_0 e^{2(g-\alpha)L}$, $I_2 = R_1 I_1 = R_1 I_0 e^{(g-\alpha)L}$ a $I_1 = I_0 e^{(g-\alpha)L}$. (R_1 a R_2 jsou odrazivosti zrcadel, L je délka rezonátoru daná vzdáleností jeho zrcadel). Z podmínky $I_4 \geq I_0$ plyne: $R_1 R_2 e^{2(g-\alpha)L} \geq 1$, což v případě rovnosti představuje tzv. *prahovou podmínku generace laserového záření*. Pro dosažení generace laserového záření musí platit: $R_1 R_2 e^{2(g-\alpha)L} > 1$, a tedy $g > (-\ln R_1 R_2) / (2L) + \alpha$.

Jakmile laserové záření dosáhne prahové hodnoty, může se jeho intenzita po dalších obězích rezonátorem zvyšovat. Narůstání intenzity probíhá až do doby, kdy čerpání dané zdrojem už nestačí vytvářet inverzní obsazení hladin – nastává tzv. *saturovací zisk*, při které satureovaný zisk vyrovnává ztráty. Intenzita I dosáhne hodnoty *saturovací intenzity* I_s , která je definována $I_s = hv / \sigma \tau$, kde τ je doba života na laserové hladině, tj. na hladině E_2 , h , ν , σ a τ jsou materiálové parametry charakterizující aktivní médium.



Obr. 8 Dosažení inverze populace hladin v tříhladinovém nebo čtyřhladinovém systému

Různé druhy laserů

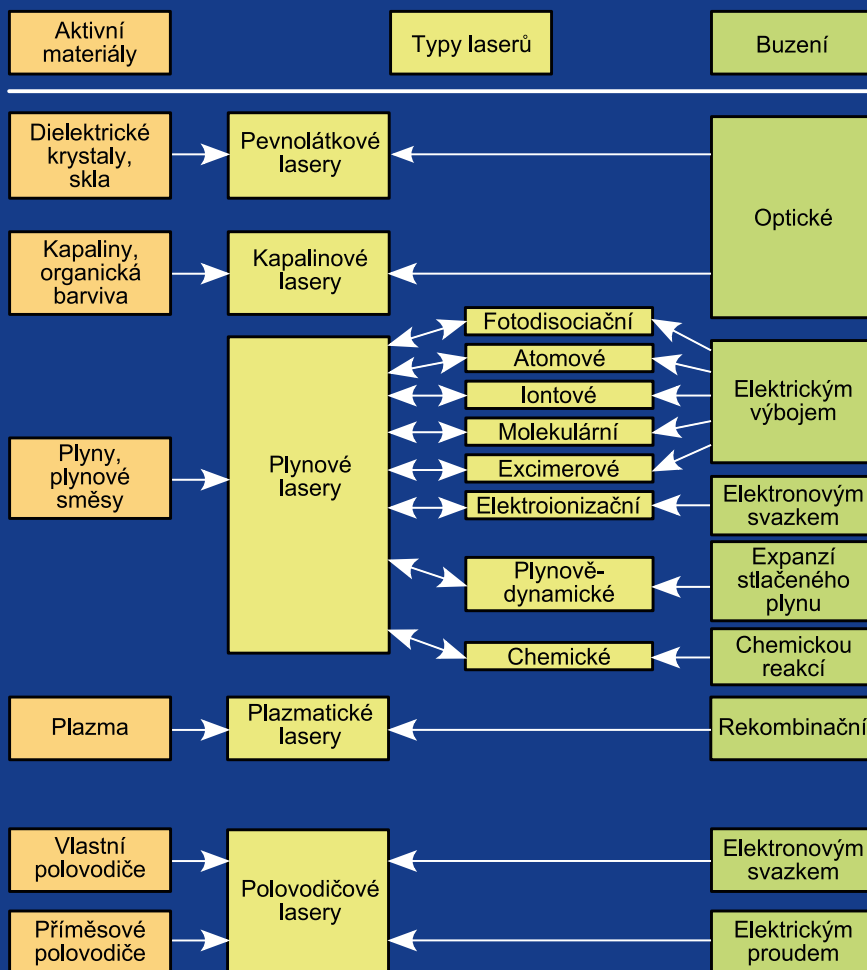
V současné době existuje velký počet laserových systémů. Abychom pochopili jejich různorodost, je vhodné roztrdit je podle kritérií, kterými obvykle jsou: aktivní prostředí, generované vlnové délky, typ kvantových přechodů, typ buzení, časový režim provozu laseru.

Podle druhu *aktivního prostředí* rozlišujeme lasery: pevnolátkové, polovodičové, plynové, kapalinové, plazmatické. Podle *generovaných vlnových délek* se lasery dělí na: infračervené, viditelné, ultrafialové a rentgenové. Podle *energetických hladin* zúčastněných při stimulované emisi jsou lasery rozlišovány jako: elektronové a molekulární (rotační, rotačně-vibrační, vibrační). Z hlediska *časového rozvoje* lze lasery rozdělit na kontinuální, kvazikontinuální a pulsní.

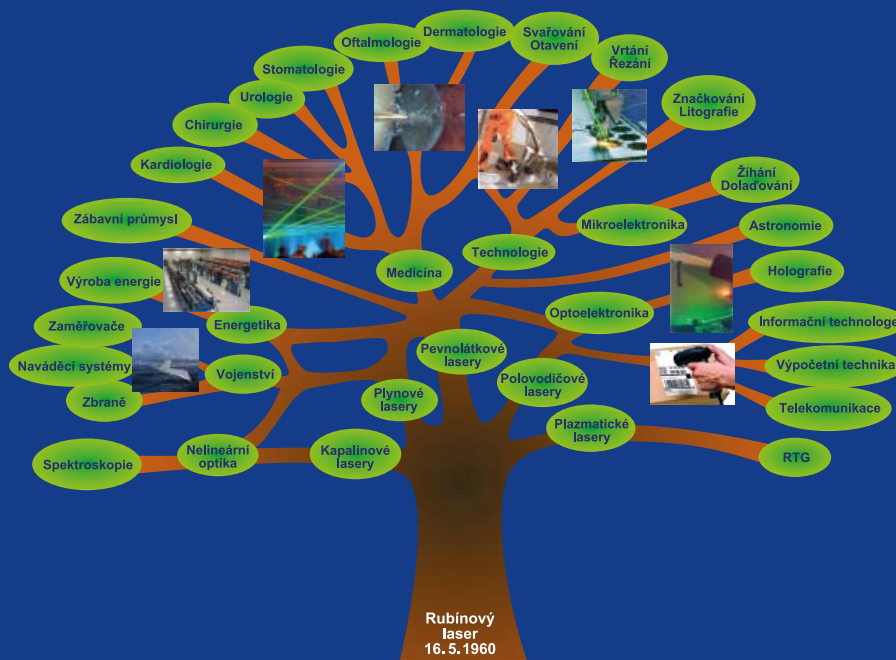
V časové doméně se můžeme setkat s kontinuálními lasery (např. laserové ukazovátka nebo výkonný MW plynový laser) a také s lasery emitujícími pulsy s délkou od milisekund (10^{-3} s) až po attosekundy (10^{-18} s). Generované energie mohou být v řádu mikrojoulů (10^{-6} J) až do několika megajoulů (10^6 J). V jednom krátkém impulsu z laseru na laboratorním stole lze běžně získat výkon 10^9 W, což řádově odpovídá výkonu elektrárenského bloku JETE.

Uvážíme-li různé typy buzení, je možné třídění laserů uspořádat do obr. 9.

Vzhledem ke svým unikátním schopnostem bylo laserové záření po uvedení prvního laseru do provozu využito téměř okamžitě v aplikacích. V medicíně (oftalmologii a dermatologii) bylo laserové záření aplikováno už v roce 1961 (operace oční sítnice) a také v technologiích byl laser použit velmi brzy. Od té doby využití laseru jenom roste. Kromě medicíny, kde se uplatňuje jak v diagnostických, tak léčebných zásadách (v oftalmologii, dermatologii, chirurgii, ORL, kardiologii, gynekologii, stomatologii, neurologii a dalších) se laser objevuje jako běžný nástroj v technologiích (použití pro řezání, sváření, vrtání), mikroelektronice (litografie), při přenosu, záznamu a vyčítání informací (optické spoje, laserové čtečky atp.), ve fyzice plazmatu (generace hustého horkého plazmatu, výzkum inerciální termojaderné syntézy), astronomii a kosmickém výzkumu, geodezii (přesné měření vzdálenosti objektů, zpřesňování tvaru Země), výzkumu a sledování atmosféry, výpočetní technice, v holografii, zábavní a vojenské technice a dalších aplikacích. Z pomyslného „stromu“, v jehož kmeni byl pevnolátkový rubínový laser (obr. 10), vyrostla celá řada různých laserů (jen pevnolátkových aktivních materiálů bylo vyzkoušeno 620) a také celá soustava aplikací, jejichž počet není ještě z daleka uzavřen.



Obr. 9 Dělení laserů



Obr. 10 Typy laserů a jejich aplikace.

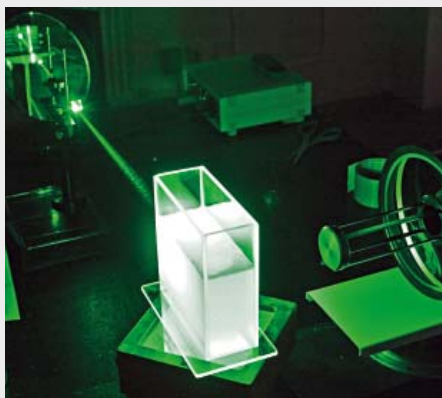
Autorka děkuje doktorandům Ing. O. Kitzlerovi a Ing. M. Fibrichovi za pomoc při vytvoření ilustrujících obrázků.

Optické prvky i pro lasery

Krátká historie

Město Turnov se může pochlubit mj. i tím, že zde najdeme nejstarší české optické pracoviště kontinuálně vyrábějící optiku – Dioptru, a. s., která v loňském roce oslavila 112 let od svého založení. Historie turnovské optické výroby je založena na opracování polodrahokamů, které je ve městě a okolí dokladováno již od patnáctého století. Kromě polodrahokamů dovedli naši předci výtečně pracovat i se sklem. A tak ve dvacátém století vznikl v Turnově Výzkumný ústav Monokrystalů, později známý pod názvem Monokrystal a transformovaný do dnešního Crytur, s. r. o.

Po zahájení programu Interkosmos v šedesátých letech hledal Astronomický ústav tehdejší ČSAV pracoviště k realizaci optiky pro družicové experimenty. Přirozeným místem hledání byl i Turnov, konkrétně Výzkumný ústav monokrystalů. Z jedné jeho skupiny bylo pak k 1. lednu 1965 vytvořeno detašované optické pracoviště Astronomického ústavu. Jeho hlavním úkolem bylo především zajistit výzkum, vývoj a výrobu optických součástí programu Interkosmos, dále pak zajišťovat i pro ostatní ústavy ČSAV vývoj a výrobu unikátních optických prvků. Pracoviště prošlo mnoha různými peripetemi, čtrnáct let fungovalo samostatně pod názvem „Vývojová optická dílna AV ČR“ a od 1. ledna 2006 je detašovanou součástí Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., v Praze.



Optické prvky obecně

Turnovské pracoviště je vybaveno technicky i personálně na přípravu všech optických dílů v rozměrech od mikročoček až do 500 mm a také příslušnou měřicí technikou. Pracoviště zvládlo nejen klasickou optiku, ale i velmi náročné přesné elementy laserové optiky či přípravu polotovarů k realizaci rentgenové optiky používané v kosmu nebo přípravu polotovarů speciálních mikroobjektív pro rentgenové ozařování. Z krystalů se zde zhotovuje optika především z krystalického křemene a vápence, ale také např. z germania, křemíku či flu-

oritu. Na pracovišti tenkých vrstev se pracuje především s tvrdými dielektriky na bázi SiO_2 , TiO_2 , HfO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 a též s kovy Al, Ag, Cu, Ni, Cr, Au atd.

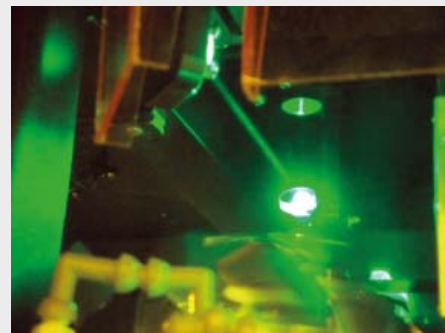
Za éru své existence se může pracoviště pochlubit celou řadou unikátních výsledků práce. V oblasti výzkumu a vývoje na pracovišti dlouhodobě působil a dosud působí dr. Ivan Šolc, známý svými pracemi v oboru krystalové a rentgenové optiky. V sedmdesátých letech zde byla vyvinuta optika pro experimenty umožňující zobrazení v RTG oblasti spektra. Pracovalo se na úzkopásmových dvojnásobně polarizačních interferenčních filtrech Šolcova i Lyotova typu, především pro pozorování chromosféry Slunce a pro diagnostiku a hrazení laserů [1], [2], [3]. V této oblasti byly též metodami napařování zhotoveny úzkopásmové dielektrické filtry Fabry-Perotova typu s pevným dielektrikem. Zajímavým úkolem byl vývoj a výroba několika typů mikroakcelerometrů. Tyto unikátní optické díly byly v provozu nejen v pozemských laboratořích, ale též na několika družicích. Byla též zhotovena řada atypických optických prvků a zařízení pro optické měřicí přístroje v ústavech ČSAV a AV ČR, především optické díly používané ke stavbě laserů.

Pracovníci oddělení optické diagnostiky Ústavu fyziky plazmatu řešili několik projektů cíleného výzkumu – v této oblasti se podařilo realizovat nové unikátní přístroje či ultrapřesné optické díly. V současné době je zde řešen i mezinárodní grantový projekt týkající se návrhu velkého evropského slunečního dalekohledu EST a také mezinárodní projekt Infrasens v rámci programu Eureka, zaměřený na využití nových optických materiálů pro použití v IR oblasti.

Laserová optika

V Československu byly první lasery realizovány počátkem šedesátých let. V dubnu 1963 byly v Praze spuštěny neodymový (FZÚ ČSAV) a poté i rubínový (ÚRE ČSAV) laser [4]. Jeden z prvních plynových laserů byl postaven v Ústavu přístrojové techniky ČSAV v Brně ve skupině vedené Františkem Petřem již v roce 1964. Některé optické díly pro tyto tehdy nové přístroje zhotovilo pracoviště v Turnově. Vývoji laserových optických dílů zde byla následně věnována mimořádná pozornost. Optika laserů se liší od klasické především tím, že vyžaduje použití dokonale homogenních optických materiálů a zároveň je nutno zvládnout závěrečné opracování optických ploch do požadovaného tvaru na zlomky vlnové délky, přičemž plochy nemají do optické soustavy vnášet rozptyl. K tomu je proto nutné uzpůsobit výrobní proces tak, aby se dosáhlo požadovaného tva-

ru plochy a mikrodrsnosti přibližně o řád lepší než při výrobě fotografické optiky. Zároveň je nutné úspěšně provést následné nanášení optických vrstev, aby takové tenké vrstvy vydržely vysoké hustoty energie v optickém svazku, které musejí přenášet. Zajištění dokonalé čistoty laserových optických ploch je zcela zásadní.



Na turnovském pracovišti byla za dobu jeho činnosti realizována velká řada všech typů dílů pro stavbu laserů. Šlo především o podložky pro zrcadla rezonátorů, průhledy, speciální hranoly, Brewsterova okénka, trubice rezonátorů, ale také o různé typy přesných fázových destiček, polarizační elementy pro kontinuální úpravu svazku, úzkopásmové hradičkové filtry [5], rozšiřovače svazku apod. Ke stavbě přístrojů využívajících lasery byly na pracovišti zhotoveny stovky optických dílů, hlavně pro ústavy Akademie a vysoké školy. S výhodou se vždy využívalo úzkých kontaktů s optikou na ostatních pracovištích. Následně tak byly do sériové výroby optických podniků vřazeny výrobky, které vznikly jako prototypy v optické dílně Akademie.

Po spuštění provozu laseru na pracovišti PALS turnovské optické pracoviště dodalo některé náročné optické díly i pro tento výkonný laser. Šlo nejen o některé justážní optické díly, ale i o výrobu rozměrných prvků, jakým byl například přesný optický klín na zdvojení laserového svazku.

Centrum speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC

Obtížnost řešení současných úkolů je stále vyšší, a to jak z hlediska komplexnosti, tak např. s ohledem na dosažení požadované přesnosti. Existující technologické a přístrojové vybavení již nepostačuje k zajištění těchto nově kladených požadavků. Z uvedených důvodů Ústav fyziky plazmatu připravil v roce 2009 projekt na vybudování „Centra speciální optiky a optoelektronických systémů (TOPTEC)“. Žádost byla podána do druhé prioritní osy operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace. Cílem projektu je zásadní modernizace a roz-

šíření současného technologického a přístrojového vybavení i posílení kolektivu výzkumných pracovníků tak, aby bylo možné dosahovat výsledků srovnatelných se špičkovými světovými pracovišti. Projekt obdržel kladné hodnocení a byl vybrán v tvrdé konkurenci ostatních projektů, v současné době je v negociační fázi a je vysoce pravděpodobné, že jeho realizace bude započata na podzim roku 2010. Ústav fyziky plazmatu očekává, že bude možné v nově vznikajícím Centru TOPTEC realizovat první úkoly smluvního výzkumu již v průběhu roku 2011 – viz inzerát v tomto čísle.

Z hlediska laserové fyziky a techniky bude obzvláště zajímavá asférická či adaptivní optika s rozměry až do 500 mm vyvíjená v Centru TOPTEC, stejně tak jako nové způsoby nanášení tenkovrstvých systémů. Dále se uvažuje

o možnosti vytváření rozměrných holografických optických elementů ultrapřesným iontovým obráběním.

Literatura

- [1] I. Šolc: „Nový typ dvojlomného filtru“, Čs. čas. fyz. 3, 266 (1953).
- [2] R. Melich, Z. Melich, I. Šolc: „Šolc birefringent filter for several interesting spectral lines“, in: *Proceedings of the Physics of Chromospheric Plasma, 2007* (Eds. P. Heinzel, I. Dorotovič, R. Rutten), Astronomical Society of the Pacific - Conference Series, Vol. 368, s. 621.
- [3] P. Koubský, P. Mayer, J. Čáp, F. Žďárský, J. Zeman, L. Pína, Z. Melich: „Ondřejov echelle spectrograph – OES“, in: *Stellar Spectroscopy at Ondřejov Observatory*, (Publications of the Astronomical Institute No. 92), Astronomical Institute AS CR, Ondřejov, 2004, s. 37.

[4] red.: „Také Československo má své lasery“, *Jemná mechanika a optika* 8, 142 (1963).

[5] Z. Melich: „Prvky krystalové optiky“, *Jemná mechanika a optika* 28, 286 (1993).

**TOP
TEC** centrum speciální optiky
a optoelektronických
systémů

Zbyněk Melich, Vít Lédl

Oddělení Optická diagnostika,
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v. v. i.,
Skálava 89, 511 01 Turnov

e-mail: vod@ipp.cas.cz;

tel.: 481 549 441; fax: 481 322 913

Vývoj monokrystalů pro pevnolátkové lasery v CRYTUR spol. s r. o.

Firma CRYTUR, spol. s r. o., byla založena v roce 1998. Svou činností navazuje na tradici vývoje a výroby syntetických monokrystalů trvající v Turnově již od roku 1943. V rámci společnosti CRYTUR jsou integrovány technologie pěstování monokrystalů, jejich opracování i napařování a naprašování dielektrických a kovových vrstev. V současné době vyrábí firma CRYTUR zejména scintilační detektory a detekční jednotky, saffírová pouzdra a kapiláry pro termočlánky a zabývá se rovněž opracováním tvrdých materiálů, například korundové keramiky.

Významnou součástí výrobního programu jsou rovněž laserové tyče, zrcadla, čočky a další



Obr. 1 Laserové tyče z produkce CRYTUR.



Obr. 2 Pec pro pěstování monokrystalů Czochralského metodou.

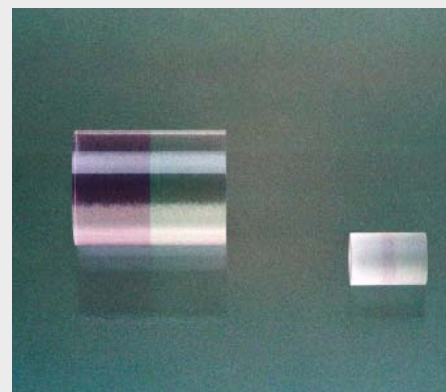
optické elementy převážně pro pevnolátkové lasery generující ve vlnové oblasti 1–3 μm .

Na vývoji laserových krystalů a optiky CRYTUR úzce spolupracuje zejména s Fyzikálním ústavem AV ČR (FZÚ) a Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze (FJFI).

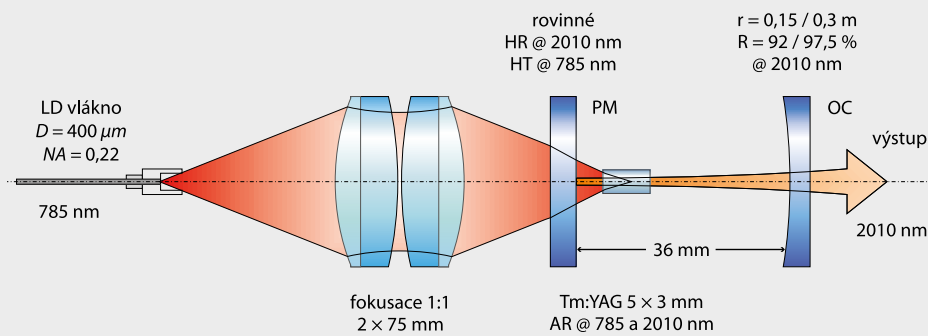
Monokrystalů určené pro výrobu laserových tyčí se pěstují Czochralského metodou tažením krystalu z taveniny na orientovaném zárodku. Automatická regulace pěstovacích pecí je založena na sledování přírůstku hmotnosti krystalu a následné regulaci příkonu odporového nebo indukčního topení.

Pro laserové aplikace se připravují zejména monokrystalů yttrito-hlinitého granátu, $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG), respektive yttrito-hlinitého perovskitu, YAlO_3 (YAP), dotované zpravidla třímocnými ionty lanthanoidů (Nd^{3+} , Tm^{3+} , Er^{3+} , Yb^{3+} atd.).

Moderní lasery axiálně čerpané polovodičovými diodami kladou zvýšené nároky na odvod tepla z aktivního prostředí. Pro diodově čerpané lasery byly vyvinuty složené laserové tyče sestávající z jednotlivých segmentů s různou koncentrací dopantu. Nedotované koncovky difusně spojené s dotovanými částmi krystalu zlepšují odvod tepla z aktivního prostředí, snižují termickou čočku a tak umožňují



Obr. 3 Složená tyč YAG-Nd:YAG.



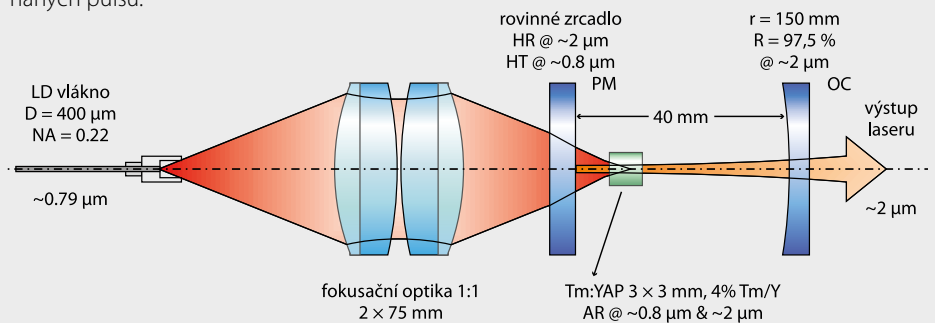
Obr. 4 Schéma Tm:YAG rezonátoru FJFI.

stabilní laserovou generaci i při vyšších čerpacích výkonech.

Oproti klasickému uspořádání jsou navíc dielektrické vrstvy napařené na nedotované koncovce méně tepelně namáhány a prodlužuje se tak jejich životnost.

Technologie difusního spojování dotovaných a nedotovaných segmentů byla nejvíce využita pro zlepšení odvodu tepla z Yb:YAG a Tm:YAG krystalů. Hlavní nevýhodou Yb³⁺ a Tm³⁺ dotovaných materiálů je tříhladinová (respektive kvazi-tříhladinová) povaha energetického schématu laserových přechodů. [1] Dolní laserová hladina je součástí starkovskými rozšířené základní hladiny. Tepelnou populací z nejnižší hladiny dochází ke snižování zisku laseru a k celkovému zhoršování podmínek generace, která je způsobena reabsorbací laserové

dlouhá doba života excitovaného stavu, což umožňuje kumulaci energie a generaci Q-spínaných pulsů.



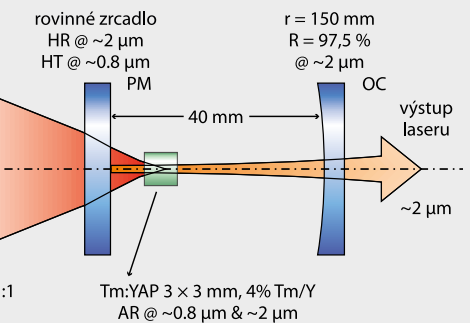
Obr. 5 Schéma Tm:YAP rezonátoru FJFI.

Technologie difusního spojování byla využita nejen ke zvýšení odvodu tepla z aktivního prostředí, ale i ke konstrukci kompaktních Q-spínaných laserů. V jednom elementu jsou bez použití pojiv a jiných světlo rozptylujících částic spojeny segmenty nedotovaného krystalu YAG, aktivního prostředí Nd:YAG a pasivního saturovatelného absorbéru V³⁺:YAG. Dielektrická zrcadla jsou napařena přímo na leštěná čela složeného krystalu.

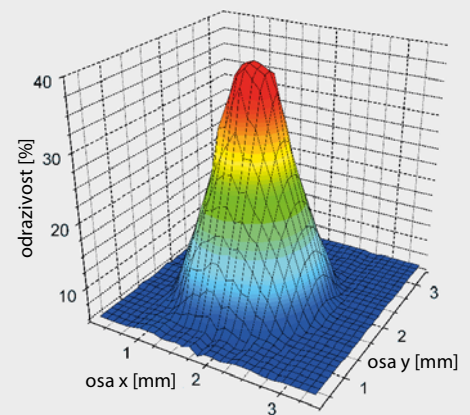
Unikátní technologie CRYTUR pro pěstování YAG v redukčním prostředí byla úspěšně využita při vývoji pasivního saturovatelného absorbéru V³⁺:YAG. Vlastnosti V:YAG saturovatelného absorbéru závisí na koncentraci a oxidačním stavu vanadových iontů, které nahrazují Al³⁺ v tetraedrické podmiřičce YAG. Krystaly V:YAG jsou používány jako pasivní závěrky pro Q-spínání Nd:YAG, Nd:YAP a Nd:YVO₄ laserů ve vlnové oblasti 1,2–1,4 μm.

Laserové krystaly vyráběné v CRYTURu se často používají v nestabilních rezonátorech.

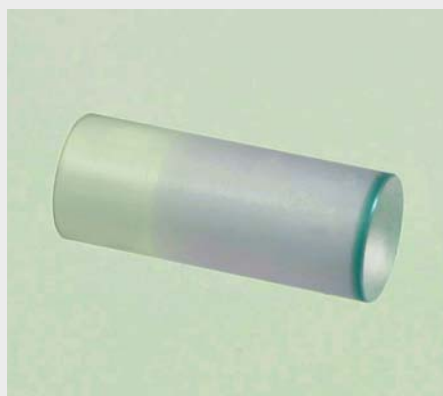
K diskriminaci módů, tzn. k upřednostnění oscilace základního módu oproti módům vyšších řádů, byla vyvinuta výstupní zrcadla s proměnnou hodnotou reflektivity. Tato takzvaná gaussovská zrcadla slouží rovněž ke zvýšení homogenity výstupního laserového svazku zejména při nízkém zesílení a vyhlazení profilu svazku, což snižuje riziko poškození optických prvků laserového rezonátoru. Reflektivita zrcadla je nevyšší uprostřed a klesá směrem k okrajům zrcadla dle $R(r) = R_0 \exp(-2(r/w_0)^n)$, kde R_0 je centrální reflektivita, r je vzdálenost od středu zrcadla, w_0 je velikost odrazné plochy a R_0/e^2 a n určují řád gaussovského profilu [3].



Krystaly a optické komponenty firmy CRYTUR nalézají uplatnění zejména v lékařských lasech a speciálních aplikacích. CRYTUR představuje své nové výrobky pravidelně na mezinárodních veletrzích (např. LASER v Mnichově) a odborných konferencích.



Obr. 8 Příklad profilu gaussovského zrcadla CRYTUR.



Obr. 6 Kompaktní 1,3 μm Q-spínaný laser.

vého záření tou částí aktivního prostředí, která není dostatečně čerpaná.

Tm:YAG a Tm:YAP lasery generující ve vlnové oblasti 2 μm se používají v radarové technice, k určování složení atmosféry a zejména pro lékařské účely. Záření v oblasti 2 μm se dobře absorbuje ve vodě a lze je použít pro řezání nebo koagulaci měkké tkáně. Na rozdíl od Er:YAG laseru lze pro přenos 2 μm laserového záření použít standardní optická vlákna.

Díky iont-iontové interakci dochází v thuliem dotovaných materiálech při absorpci buďícího záření ve vlnové oblasti 0,8 μm ke vzniku páru excitovaných iontů Tm³⁺. Vzhledem k tomuto efektu má Tm:YAP a Tm:YAG laser podstatně větší účinnost, než by odpovídalo přenosu energie čerpacího záření na fotony s více než dvojnásobnou vlnovou délkou [2]. Další výhodou Tm:YAG a Tm:YAP laserů je



Obr. 7 Pasivní saturovatelný absorbér V:YAG.

Literatura

- [1] W. Koehner: *Solid State Laser Engineering*, 5th ed., Springer-Verlag, Berlin 1999.
- [2] R. C. Powell: *Physics of Solid-State Laser Materials*, Springer-Verlag, New York 1998.
- [3] Prospekt CRYTUR, Graded reflectivity mirrors, 2008.

www.crytur.cz



Karel Nejezchleb

CRYTUR, s. r. o., Palackého 175, 511 01 Turnov