

Přesné měření Figure of Merit safíru dopovaného titanem

Vojtěch Miller <vojtech.miller@tul.cz>, Karel Žídek

Na poli laserových elementů v infračervené oblasti v poslední době začíná hrát stále významnější roli safír dopovaný titanem. Tento materiál se vyznačuje výbornými vlastnostmi – absorpcí ve viditelné oblasti kolem 532 nm a minimální residuální absorpcí v oblasti laserování. Tento příspěvek se zabývá sestavením měřicí aparatury, která by byla schopná určit Figure of Merit safíru dopovaného ionty Ti^{3+} v dostatečné přesnosti, aby šlo spolehlivě určit kvalitu materiálu tak, aby byl vhodný pro výrobu infračerveného laseru.

Klíčová slova: Laser, přesné měření, Ti:safír, absorpce

Úvod

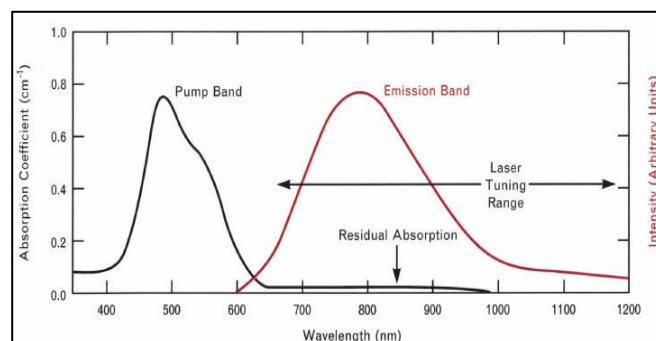
Při určování kvality materiálu pro laserové elementy, v tomto případě konkrétně pro materiál safír dopovaný titanem (Ti:Saf), jde primárně o určení takzvaného Figure of Merit (FoM). Čím vyšší je FoM, tím kvalitnější je materiál, tedy vhodnější pro laserování. Přesné určení tohoto parametru závisí na residuální absorpci materiálu, která má velmi nízké hodnoty, jejichž změření s dostatečnou přesností je značně problematické. Cílem tohoto příspěvku je uvést měřicí aparaturu, která by byla schopna určit tento parametr s dostatečně malou odchylkou měření.

Metodika

Ti:Saf je materiál, který vykazuje výborné optické vlastnosti, jichž se dá využít pro konstrukci pevnolátkového laseru pro laditelné infračervené (IR) spektrum. Na obrázku 1 níže je vidět absorpční, emisní a residuální spektrum Ti:Saf. [1, 2]

Absorpční spektrum je centrováno na oblast 490 nm, či 530 nm. Kvůli této pozici absorpčního peaku se často jako zdroj buzení používá široce využívaný Nd:YAGový laser na druhé harmonické frekvenci (532 nm). Emisní peak Ti:Saf se nachází v blízké infračervené oblasti (cca 600-1200 nm, s maximem kolem vlnové délky 800 nm). V této oblasti se zároveň nachází residuální peak, který je nechtěným jevem způsobeným konglomeráty iontů Ti^{3+} a Ti^{4+} . [2]

Ti:Saf elementy/materiál se vyrábí v různých koncentracích. Typicky jde o elementy s absorpčním koeficientem v rozsahu $1-7 \text{ cm}^{-1}$ na vlnové délce 532 nm.



Obrázek 1: Spektrální vlastnosti Ti:Saf

Při měření FoM, který je poměrem absorpčního koeficientu v absorbuji oblasti (konkrétní vlnová délka určena konkrétním uživatelem – v tomto příspěvku uvažováno 532 nm) a absorpčního koeficientu v emisní oblasti (opět záleží na uživateli – zde uvažováno 800 nm), viz rovnice (1).

$$FoM = \frac{\lambda_{532 \text{ nm}}}{\lambda_{800 \text{ nm}}} \quad (1)$$

Jednotlivé absorpční koeficienty jsou vypočteny ze změřené transmise a tloušťky vzorku. Problém, který zde nastává je právě měření transmise vzorků. Je potřeba s velkou přesností (lepší jak 0,1 %) změřit jak vysoko-absorbující oblast (532 nm), tak nízko-absorbující oblast (800 nm). Měření těchto dvou oblastí najednou je problematické, protože i když je tloušťka vzorku upravena tak, aby pomáhala jednomu měření tak zároveň přidává chybu do měření druhého. Tento problém se projeví měřením hodnot transmise blízkých buď 100 % nebo 0 %. [3]

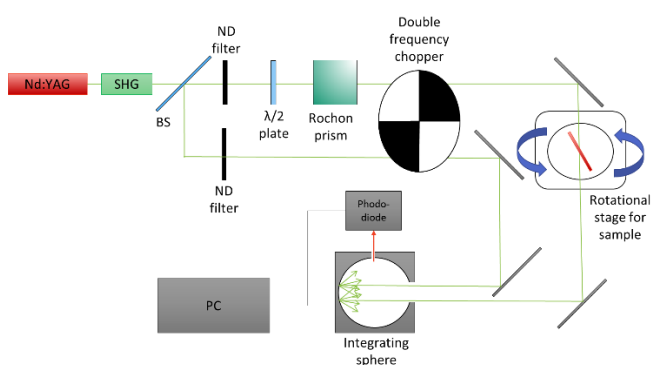
Z tohoto důvodu je potřeba sestavit takovou měřicí aparaturu, jež bude mít přesnost ideálně lepší, než je

0,01 %. Tento limit je zvolen na základě odchylek FoM, které z odchylek měření transmise vycházejí.

Výsledky a diskuze

Měřicí set-up byl nejprve z praktických důvodů postaven na zeleném laseru (532 nm). Laserový svazek ve viditelném spektru jde daleko lépe korigovat než v IR.

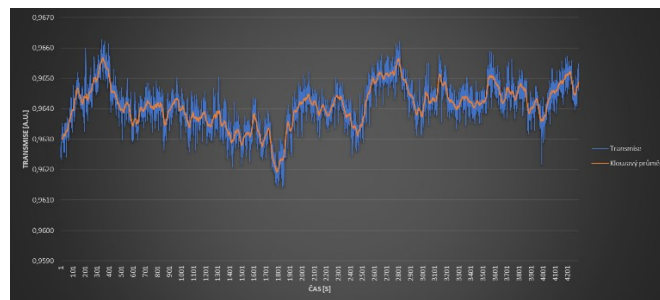
Aparatura se skládá z následujících elementů: laserové záření je generováno v Nd:YAG laseru na druhé harmonické hladině. Tento svazek je pomocí beam-splitteru rozdělen na měřicí a referenční větev. Měřicí větev obsahuje půlvlnnou destičku pro korekci orientace p-polarizace, dále Rochonův hranol pro získání polarizace v poměru lepším než 1:100 000 (při uvažovaných přesnostech hraje roli i zbytkové s-polarizované světlo). Následně svazek prochází přes chopper s dvojitou frekvencí – 4:7. Chopper moduluje jednou frekvencí měřicí svazek a druhou frekvencí referenční svazek, což umožňuje sběr obou signálů na jednu fotodiodu (ve které jsou pak následnou frekvenční analýzou získána potřebná data). Takovýto svazek pak prochází vzorkem a následně je veden do integrační koule, která zajišťuje, že je svazek nezávislý na místě dopadu. Referenční větev je taktéž modulována pomocí chopperu a je přivedena do integrační koule. Signál z integrační koule je sbírán fotodiodou, která převádí optický signál do digitální podoby.



Obrázek 2: Schéma měřicí aparatury

Naměřená dlouhodobá statistika (cca 1 hodina) na jednom vzorku dosahovala odchylky menší než 0,07%. Při krátkodobé statistice tato hodnota dosahuje přesnosti pod 0,04 %. V následujících krocích bude analyzováno, jak zlepšit dlouhodobou stabilitu a případně zlepšit celkovou odchylku měření, tak aby

bylo dosaženo vytyčené cílové hodnoty odchylky pod 0,01 %.



Obrázek 3: Dlouhodobá stabilita měření

Závěr

Byla sestavena první část měřicí aparatury, která umožňuje měření transmise (potřebné pro určení FoM) na vlnové délce 532 nm s přesností pod 0,04 %. Tato aparatura bude dále rozšířena o měření v IR oblasti pomocí erbiového laseru, tak aby vznikl komplexní měřicí přístroj umožňující přesné určení FoM. Dále bude zkoumáno, jak zlepšit přesnost měření, tak aby bylo dosaženo hodnot odchylky, co nejbližší vytyčenému cíli 0,01 %.

Poděkování

Tato práce byla podpořena z projektu Studentské grantové soutěže (SGS) na Technické univerzitě v Liberci v roce 2021.

Reference

- [1] MOULTON, Peter F., Jeffrey G. CEDERBERG, Kevin T. STEVENS, Greg FOUNDOS, Michal KOSELJA a Jana PRECLIKOVA. Characterization of absorption bands in Ti:sapphire crystals. *Optical Materials Express* [online]. 2019, **9**(5), 2216–2251. ISSN 2159-3930. Dostupné z: doi:10.1364/OME.9.002216
- [2] KRYVONOSOV, Ie. V. a L. A. LYTVYNOV. Properties of Ti-sapphire as laser material. *Crystallography Reports* [online]. 2012, **57**(7), 967–973. ISSN 1063-7745, 1562-689X. Dostupné z: doi:10.1134/S1063774512070139
- [3] GAO, Bo, Wei JIANG, An-Wen LIU, Yan LU, Cun-Feng CHENG, Guo-Sheng CHENG a Shui-Ming HU. Ultrasensitive near-infrared cavity ring-down spectrometer for precise line profile measurement. *The Review of Scientific Instruments* [online]. 2010, **81**(4), 043105. ISSN 1089-7623. Dostupné z: doi:10.1063/1.3385675