

**Oponentský posudek na disertační práci Ing. Martina Vaňka o názvu „Use of diffractive optical elements in high power fiber lasers“**

Disertační práce se zabývá vývojem a výrobou difrakčních struktur pro vysokovýkonné vláknové lasery. Jejím cílem bylo, za prvé navrhnout difrakční prvky o specifických vlastnostech z pohledu odrazivosti světla a polarizační selektivity, za druhé navrhnout technologii jejich vytvoření přímo na čele optického vlákna a za třetí otestovat zhotovené difrakční struktury.

Jako klíčové technologie pro vytvoření difrakčních prvků byla zvolena metoda fokusovaného iontového svazku, zkráceně FIB. Tato metoda prodělala v předchozím desetiletí velmi rychlý rozvoj, který se mimo jiné projevuje i dramatickým nárůstem počtu instalací FIB-SEM systémů a jejich zvyšující se dostupností. Toto vytváří předpoklady pro vznik nových nanotechnologických postupů v mnoha oblastech vědy a výzkumu i v průmyslových aplikacích. Použití FIB na přímý zápis difrakčních prvků do optického vlákna je inovativní řešení, jehož potenciál v oblasti zdokonalování struktur vláknových laserů nebyl ještě zdaleka vyčerpán. Z těchto důvodů pokládám tematiku disertace za vysoce aktuální.

Práce je přehledně strukturovaná do úvodu, čtyř hlavních kapitol, závěru, referencí a seznamu publikací dizertanta.

V první kapitole jsou vysvětleny základy použitých numerických simulačních metod, představen fyzikální model třech typů jednodimenzionálních difrakčních mřížek, prezentovány výsledky simulací, jejichž výstupem byly optimalizované geometrické parametry zmíněných mřížek pro jejich následnou výrobu na čele optických vláken.

Ve druhé kapitole je popsán postup přípravy optického vlákna pro následný zápis difrakční struktury. Zde dizertant dobře zvládl několik kritických technologických kroků, a to zejména dosažení rovného a čistého povrchu čela optického vlákna, zhotovení speciálního držáku pro 6 optických vláken, uchycení optických vláken v držáku zaručující dostatečný odvod elektrického náboje, nanášení tenké vrstvy s vysokým indexem lomu. Ze velmi inovativní pokládám poměrně sofistikovanou konstrukci držáku optických vláken. Na druhé straně jsou tam terminologické nejasnosti týkající se metody nanášení tenké vrstvy, které mohou být pro čtenáře matoucí.

Třetí kapitola začíná popisem mikroskopicko-nanotechnologického systému FIB-SEM Lyra 3. Následuje jedna z klíčových technologických částí, a tou je zamezení nebo redukce nabíjení povrchu čela vlákna, resp. tenké vrstvy s vysokým indexem lomu, během vymílání difrakčních mřížek. Dizertant vyzkoušel několik postupů, jak redukovat nabíjení: nanášení vodivého polymeru, uhlíku, chromu, platiny, působení elektronového svazku. Z textu vyplývá, že se jednalo o náročnou experimentální část hledání optimálního postupu a že nakonec byl problém nabíjení řešen případ od případu buď jen kompenzací elektronovým svazkem anebo kombinací elektronového svazku a nanášení vrstev chromu nebo platiny. Podstatnou část kapitoly tvoří popis optimalizace nastavení FIB a realizace struktur numericky namodelovaných v první kapitole: antireflexních, nízko-reflexních a vysoce reflexních mřížek. Kromě hledání optimálních parametrů zde řešil dizertant nepříjemný problém dlouhodobé stability FIB procesu a závěrečná část kapitoly – fotografie vytvořených dvoudimenzionální mřížek ukazují, že tento úkol dobře zvládl. Inovativními prvky této části disertace je využití metody iontově indukovaného nanášení platiny ve formě vodivých ohrádek okolo jádra vlákna a doladování parametrů FIB pomocí testovacích mřížek na okraji vlákna. Určitým nedostatkem jsou opět nejasné formulace týkající se metod nanášení tenkých vrstev a vysvětlení procesu nabíjení nevodivých vzorků působením elektronových a iontových svazků.

V poslední kapitole je popsáno experimentální ověření vyrobených difrakčních struktur. U antireflexní struktury bylo dosaženo téměř řádového snížení koeficientu odrazu při současném mírném snížení transmise. U polarizačně selektivních nízko-reflexních mřížek bylo dosaženo polarizačního extinkčního poměru 10-20 dB podle výkonu laseru. Měření polarizačně selektivních vysoce-reflexních mřížek narazilo na problém překročení prahu destrukce materiálu.

Mé hodnocení předložené disertace je celkově pozitivní jak z hlediska plnění cílů práce, tak z hlediska jejích výsledků. Hlavním vědeckým přínosem práce je získání nových poznatků v oblasti vlastností difrakčních struktur integrovaných na čele optického vlákna a v oblasti nanotechnologických postupů jejich výroby. Tyto výsledky byly publikovány ve dvou vědeckých časopisech, které patří v daném oboru mezi významné časopisy a prezentovány na mezinárodních konferencích. Nedotažení poslední ze tří plánovaných difrakčních struktur do fáze funkční vysoce-reflexní mřížky toto mé hodnocení nijak nesnižuje, neboť se jedná o vysoce náročný výzkumný úkol, který by mohl vydat za další samostatnou disertaci nebo její podstatnou část.

Z pohledu anglického jazyka působí na mě práce určitou nevyvážeností. V kapitolách v oboru vláknových laserů, modelování difrakčních prvků a jejich testování je angličtina kvalitní, v technologických kapitolách jsou však terminologické nepřesnosti (sputtering vs. evaporation) a neobvyklé nebo nepřesné jazykové obraty, např. „...electrons...are implanted...“, „spits of carbon“, „anti-charging“.

Abych si ujasnil, zda se jedná o terminologické nepřesnosti anebo o nedostatky v porozumění fyzikálním základům využívaných technologií, měl by dizertant zodpovědět následující otázky:

- 1) Na str. 18 je zmínka o limitech vyrobitelnosti difrakčních struktur. Jaký parametr nebo vlastnost použité technologie jsou příčinou limitu vyrobitelnosti studovaných difrakčních mřížek, např. z hlediska jejich hloubky  $h$ ?
- 2) V práci jsou zmíněny tři technologie vakuového nanášení tenkých vrstev: napařování elektronovým svazkem (electron beam evaporation), napařování (sputtering), nanášení indukované iontovým svazkem (ion beam induced deposition). Jaký je rozdíl mezi těmito třemi metodami, např. z hlediska uvolňování a transportu zdrojového materiálu na podložku? Je název kapitoly 2.2 "Sputtering process" správně vzhledem k fyzikálním charakteristikám použitého procesu nanášení tenkých vrstev?
- 3) Jaké procesy ovlivňují vznik elektrického náboje na povrchu nevodičů v důsledku dopadu elektronového nebo iontového svazku? Může se povrch nabít, v závislosti na parametrech elektronového nebo iontového svazku a typu materiálu, kladně i záporně?
- 4) Co je fyzikálním důvodem redukce nabíjení povrchu nevodiče při snižování urychlujícího napětí elektronového svazku?

Závěrem konstatuji, že úroveň i dosažené výsledky této práce splňují požadavky na disertaci a proto předloženou disertační práci doporučuji k obhajobě.