

Optická kontrola kvality laserových krystalů

Diplomová práce

<i>Studijní program:</i>	N3901 Aplikované vědy v inženýrství
<i>Studijní obor:</i>	Aplikované vědy v inženýrství
<i>Autor práce:</i>	Bc. Eva Roiková
<i>Vedoucí práce:</i>	doc. RNDr. Miroslav Šulc, Ph.D. Katedra fyziky
<i>Konzultanti práce:</i>	Ing. Štěpán Kunc, Ph.D. Katedra fyziky Ing. Karel Nejezchleb, Ph.D. Crytur spol. s. r. o., Turnov





Zadání diplomové práce

Optická kontrola kvality laserových krystalů

Jméno a příjmení: **Bc. Eva Roiková**
Osobní číslo: M18000178
Studijní program: N3901 Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Aplikované vědy v inženýrství
Zadávací katedra: Katedra fyziky
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se současnými metodami optické kontroly kvality laserových krystalů.
2. Navrhněte metodu automatizovaného měření extinkčního poměru laserových tyčí.
3. Připravte metodu počítačové vizualizace mechanického pnutí v laserových tyčích.
4. Osvojte si používání interferometrického měření k charakterizaci laserových tyčí, zdokonalte digitalizaci výstupů měření a interpretaci výsledků.
5. Realizujte navržené metody kontroly a použijte je k charakterizaci řady Nd:YAG laserových tyčí.
6. Otestujte vybrané měřené krystaly v laserovém generátoru, sledujte kvalitu laserového svazku.
7. Posuďte vliv extinkce, dvojlomu a nehomogenity indexu lomu na výslednou kvalitu laserových tyčí.
8. Diskutujte nutné podmínky kvality laserových tyčí pro získání laserového záření definovaných parametrů.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby
50 – 70 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] MALÝ P., Optika, Karolinum, 2008, ISBN: 9788024613420
- [2] SALEH, B. E. A. – Teich, M.C.: Základy fotoniky I,II , MATFYZPRESS, Praha, 1994-95
- [3] KOECHNER, Walter. Solid-state laser engineering. 6th rev. and updated ed. New York, NY: Springer, c2006. ISBN 9780387290942.
- [4] POKHREL, M., N. RAY, G. A. KUMAR a D. K. SARDAR. Comparative studies of the spectroscopic properties of Nd³⁺: YAG nanocrystals, transparent ceramic and single crystal. Optical Materials Express 2012, 2(3) DOI: 10.1364/OME.2.000235. ISSN 2159-3930.
- [5] SPRINGER, Ryan M., Michael E. THOMAS a Richard I. JOSEPH. Analysis and Comparison of Single-Crystal and Polycrystalline Nd: YAG, Scatter. IEEE Journal of Quantum Electronics 2015, 51(8), 1-8 DOI: 10.1109/JQE.2015.2442761. ISSN 0018-9197
- [6] WEBER, M. J., M. BASS, K. ANDRINGA, R. R. MONCHAMP a E. COMPERCHIO. CZOCHRALSKI GROWTH AND PROPERTIES OF YAIO 3 LASER CRYSTALS. Applied Physics Letters 1969, 15(10), 342-345 DOI: 10.1063/1.1652851. ISSN 0003-6951

Vedoucí práce: doc. RNDr. Miroslav Šulc, Ph.D.
Katedra fyziky

Konzultanti práce: Ing. Štěpán Kunc, Ph.D.
Katedra fyziky
Ing. Karel Nejezchleb, Ph.D.
Crytur spol. s. r. o., Turnov

Datum zadání práce: 17. října 2019
Předpokládaný termín odevzdání: 18. května 2020

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

prof. Mgr. Jiří Erhart, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědoma toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědoma následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

29. května 2020

Bc. Eva Roiková

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala doc. RNDr. Miroslavu Šulcovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a vstřícnost při konzultacích diplomové práce. Dále děkuji Ing. Karlu Nejezchlebovi, Ph.D. za spolupráci a věcné připomínky. Mé poděkování patří také Crytur spol. s r. o., v jehož laboratořích jsem mohla vypracovat experimentální část této diplomové práce.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na metody optické kontroly kvality laserových tyčí. Zkoumané laserové tyče byly vyrobeny z monokrystalů yttrito-hlinitého granátu dopovaného neodymem (Nd: YAG).

Teoretická část je zaměřena na popis laserových krystalů a fungování laseru v souvislosti s optickou kvalitou laserových tyčí. V této části jsou také studovány současně používané metody optické kontroly kvality laserových tyčí.

Experimentální část se věnuje inovaci a aplikaci současně používaných metod optické kontroly kvality laserových tyčí. Je zde popsán postup vytvoření počítačové vizualizace mechanického pnutí v laserových tyčích mezi zkříženými polarizátory. Dále je také popsán postup vytvoření automatizovaného měření extinkčního poměru laserových tyčí. Po zhotovení těchto inovací byl vybraný soubor laserových tyčí podroben těmto měřením společně s měřením deformace vlnoplochy v Zygo interferometru typu Fizeau. Na několika vybraných vzorcích byla také zkoumána výstupní energie laserového svazku s proměnnou čerpací energií.

Na základě pořízených obrazů metodou vizualizace mechanického pnutí v laserových tyčích byly odlišeny dvě hlavní kategorie poruch – materiálové poruchy, vzniklé pěstováním laserového krystalu (praskliny, nehomogenita indexu lomu), a poruchy indukované opracováním pláště laserové tyče (broušením, leštěním, částečným broušením, poruchy na okraji laserové tyče). Pro jednotlivé typy poruch byly vytvořeny přehledové tabulky s ohledem na jejich závažnost. Nakonec byly diskutovány souvislosti mezi jednotlivými zkoumanými parametry.

Klíčová slova

Laserový monokrystal, laserová tyč, Nd: YAG, extinkční poměr, deformace vlnoplochy

Abstract

This master thesis is focused on optical control of laser crystals quality. The examined laser rods were made of neodymium-doped yttrium aluminium garnet (Nd: YAG) single crystals.

The theoretical part is focused on the description of the laser crystals and a laser operation in a context of the optical quality of the laser rods. This part is also discussing currently used methods of optical control of laser rods quality.

The experimental part is devoted to innovations and applications of the currently used methods of optical control. The process of creating a digitalized observation of a mechanical stress in the laser rods between crossed polarizers is described. The next innovated method of optical control is automatization of the laser rod extinction ratio measurement. A selected set of the laser rods was examined by the innovated methods of optical control measurement together with a wavefront deformation measurement in the Zygo Fizeau double-pass interferometer. The output energy of a laser beam with variable pumping energy was also examined on several selected samples.

Two main defect categories were distinguished based on the taken images from the observation of the mechanical stress in the laser rods. The first category of the laser rods defects – material defects (cracks and inhomogeneity of the refractive index) – was caused by laser crystal growing, the second category of the laser rods defects was induced by a surface treatment of the laser rods (grinding, polishing, partial grinding and defects at the edge of the laser rod). There were made overview tables for individual types of the defects with regard of severity of the defects. Finally, the relationships between the individual examined parameters were discussed.

Key Words

Laser single crystal, laser rod, Nd: YAG, extinction ratio, wavefront deformation

Obsah

1	Úvod	14
2	Teorie laserových krystalů	16
2.1	Interakce záření s atomy	16
2.1.1	Absorpce	17
2.1.2	Spontánní emise.....	17
2.1.3	Stimulovaná emise.....	18
2.2	Laser.....	19
2.2.1	Dělení laserů	20
2.2.2	Optický zesilovač – aktivní medium	20
2.2.3	Rezonátor	20
2.2.4	Zdroj energie (čerpání)	24
2.2.5	Chlazení	24
2.3	Laserové monokrystaly	24
2.3.1	Monokrystal	25
2.3.2	Pěstování monokrystalů	25
2.3.3	Distribuční koeficient	27
2.3.4	Poruchy, defekty	28
2.3.5	Kontrola defektů vypěstovaného monokrystalu	28
2.4	Typy laserových monokrystalů.....	30
2.4.1	Rubín.....	30
2.4.2	Nd: YAG.....	30
2.4.3	Nd: YAP	31
3	Současné metody kontroly kvality laserových tyčí	33
3.1	Laserová tyč	33
3.1.1	Temperace.....	35
3.2	Vizuální kontrola homogenity laserové tyče	35
3.3	Měření extinkčního poměru.....	36
3.4	Interferometrická měření	36
3.4.1	Deformace vlnoplochy.....	37
3.4.2	Michelsonův interferometr	37
3.4.3	Mach–Zehnderův interferometr	38
3.4.4	Zygo interferometr	39
3.5	Výstupní energie laserové svazku.....	44
4	Experimentální část	46
4.1	Vzorky	46
4.2	Metoda počítačové vizualizace mechanického pnutí v laserových tyčích.....	47
4.2.1	Původní postup pozorování mechanického pnutí	47
4.2.2	Počítačová vizualizace mechanického pnutí.....	48

4.3	Měření deformace vlnoplochy	49
4.3.1	Postup měření deformace vlnoplochy.....	49
4.4	Automatizace měření extinkčního poměru	51
4.4.1	Princip měření extinkčního poměru.....	52
4.4.2	Měřicí sestava pro měření extinkčního poměru.....	52
4.4.3	Popis skriptu pro automatizované měření extinkčního poměru.....	55
4.4.4	Nejistota měření extinkčního poměru.....	59
4.5	Měření výstupní energie a profilu laserového svazku	60
4.5.1	Optická sestava měření a použité přístroje	60
4.5.2	Postup měření výstupní energie a profilu laserového svazku.....	61
5	Výsledky	62
5.1	Limity sledovaných parametrů	62
5.2	Laserové tyče bez poruchy	63
5.3	Materiálové poruchy laserové tyče	64
5.3.1	Praskliny	64
5.3.2	Nehomogenity indexu lomu – „šlíry“	67
5.4	Poruchy indukované opracováním.....	70
5.4.1	Indukované pnutí – broušení pláště laserové tyče	70
5.4.2	Idukované pnutí – leštění pláště.....	73
5.4.3	Idukované pnutí – částečné broušení pláště.....	75
5.4.4	Okrajové defekty.....	77
5.5	Extrémní případ nekvalitní laserové tyče	77
5.6	Výstupní energie a profil laserového svazku	78
6	Diskuse.....	81
7	Závěr.....	85
	Seznam použité literatury a zdrojů.....	87

Seznam obrázků

Obrázek 1: Přejchody mezi hladinami atomu	16
Obrázek 2: Absorpce	17
Obrázek 3: Spontánní emise	18
Obrázek 4: Stimulovaná emise	19
Obrázek 5: Schéma laserového rezonátoru.....	21
Obrázek 6: Schematický diagram výstupního spektra laseru bez výběru módů	22
Obrázek 7: Rozložení příčných cylindrických módů	23
Obrázek 8: Rozložení příčných obdélníkových módů.....	23
Obrázek 9: Struktura monokrystalu	25
Obrázek 10: Struktura polykrystalu	25
Obrázek 11: Schéma Czochralskiho metody	27
Obrázek 12: Monokrystal umístěný v polariskopu.....	29
Obrázek 13: Princip rentgenové topografie s využitím roztaženého svazku.....	30
Obrázek 14: Monokrystal Nd: YAG.....	31
Obrázek 15: Laserové tyče	33
Obrázek 16: Standardní provedení drážkovaného povrchu laserové tyče	34
Obrázek 17: Polariskop.....	35
Obrázek 18: Michelsonův interferometr	38
Obrázek 19: Mach–Zehnderův interferometr	39
Obrázek 20: Fizeau interferometr	40
Obrázek 21: Ilustrace odečtení aberace	40
Obrázek 22: Ilustrace TLT.....	41
Obrázek 23: Ilustrace PWR	42
Obrázek 24: Ilustrace AST	42
Obrázek 25: Ilustrace použití masky	43
Obrázek 26: Ilustrace chyby peak-to-valley	44
Obrázek 27: Laserový rezonátor pro měření výstupní energie laserového svazku	45
Obrázek 28: Laserová tyč umístěná v prizmatu mezi zkříženými polarizátory	47
Obrázek 29: Kamera Levenhuk umístěná v tubusu polariskopu na místo okuláru	48
Obrázek 30: Obraz bez úprav	48
Obrázek 31: Obraz s použitím filtru IČ a úprav pomocí softwaru	48
Obrázek 32: Obraz s použitím filtru IČ	48

Obrázek 33: Zygo interferometr	49
Obrázek 34: Interferenční obraz	50
Obrázek 35: Rozhraní programu MetroPro® – příklad interferogramu	50
Obrázek 36: Zapouzdřený měřicí systém (MFFT)	52
Obrázek 37: Schéma původní sestavy měření extinkčního poměru	53
Obrázek 38: Schéma nové měřicí sestavy extinkčního poměru	54
Obrázek 39: Znázornění nehomogenit laserové tyče.....	55
Obrázek 40: Grafické uživatelské rozhraní pro měření extinkčního poměru	55
Obrázek 41: Příklad laserové tyče bez poruchy.....	63
Obrázek 42: Laserová tyč č. 8A196.....	68
Obrázek 43: Laserová tyč č. U260.....	68
Obrázek 44: Laserová tyč špatné kvality pozorována mezi zkříženými polarizátory – Maltézský kříž.....	77
Obrázek 45: Laserová tyč špatné kvality pozorována mezi zkříženými polarizátory – dvě hyperboly	77
Obrázek 46: Řezy optických indikatrix	83

Seznam grafů

Graf 1: Vyzařovací spektrum xenonové výbojky	45
Graf 2: Závislost PER na kategorii prasklin (PA, PB, PC, PD)	66
Graf 3: Praskliny – závislost WFD na PER.....	66
Graf 4: Závislost PER na kategorii nehomogenity indexu lomu (NA, NB, NC)	69
Graf 5: Nehomogenita indexu lomu – závislost WFD na PER	69
Graf 6: Závislost PER na kategorii indukovaného pnutí způsobeného broušením pláště (BA, BB, BC, BD, BE).....	72
Graf 7: Indukované pnutí způsobené broušením pláště – závislost WFD na PER.....	72
Graf 8: Závislost PER na kategorii indukovaného pnutí způsobeného leštěním (LA, LB, LC).....	74
Graf 9: Indukované pnutí způsobené leštěním – závislost WFD na PER	74
Graf 10: Hodnota PER v závislosti na fázi opracování laserových tyčí s finálně částečně broušeným pláštěm	76

Graf 11: Závislost výstupní energie laserového svazku E_{out} na energii čerpání E_{in} pro laserové tyče 4,5 x 49 mm	79
Graf 12: Závislost výstupní energie laserového svazku E_{out} na energii čerpání E_{in} pro laserové tyče 6 x 116 mm	80

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti Nd: YAG a Nd: YAP.....	32
Tabulka 2: Typy aberací, které lze kompenzovat v Normálním modu interferometru ..	41
Tabulka 3: Skupiny vzorků laserových tyčí	46
Tabulka 4: Přepočtová tabulka jednotek pro rotační motory.....	57
Tabulka 5: Hodnocení velikosti deformace vlnoplochy (WFD) a extinkčního poměru (PER) vzhledem k rozměru laserové tyče.....	62
Tabulka 6: Naměřená data pro laserové tyče bez poruchy	63
Tabulka 7: Praskliny rozřazené do skupin podle jejich typu	64
Tabulka 8: Naměřená data pro laserové tyče s materiálovou poruchou – Praskliny	65
Tabulka 9: Nehomogenity indexu lomu rozřazené do skupin podle jejich typu	67
Tabulka 10: Naměřená data pro laserové tyče s materiálovou poruchou – Nehomogenita indexu lomu	67
Tabulka 11: Indukované pnutí způsobené broušením pláště	70
Tabulka 12: Naměřená data pro laserové tyče s poruchami způsobenými broušením pláště	71
Tabulka 13: Indukované pnutí způsobené leštěním pláště	73
Tabulka 14: Naměřená data pro laserové tyče s poruchou způsobenou leštěním pláště	73
Tabulka 15: Indukované pnutí způsobené částečným broušením pláště	75
Tabulka 16: Naměřená data pro laserové tyče s materiálovou poruchou – Indukované pnutí způsobené částečným broušením.....	75
Tabulka 17: Laserové tyče s okrajovým defektem	77
Tabulka 18: Naměřená data pro laserové tyče s materiálovou poruchou – Okrajový defekt	77
Tabulka 19: Naměřená data pro laserové tyče s velmi špatnou kvalitou.....	78
Tabulka 20: Výstupní energie E_{out} pro laserové tyče 4,5 x 49 mm	78
Tabulka 21: Výstupní energie E_{out} pro laserové tyče 6 x 116 mm	79

Seznam zkratek a symbolů

c	Rychlost světla
c_L	Koncentrace příměsi v tavenině
c_S	Koncentrace příměsi v krystalu
E_1, E_2	Energetické hladiny
E_{in}	Čerpací energie výbojky
E_{out}	Výstupní energie laserového svazku
FFT	Rychlá Fourierova transformace
f_p	Frekvence opakování pulsů v režimu volné oscilace modů
HR	Vysoce odrazivé (zrcadlo)
k	Distribuční koeficient
λ	Vlnová délka
L	Délka kavity
MFFT	Měřicí systém se zpracováním pomocí FFT
Nd: YAG – $Y_3Al_5O_{12}$	Yttrito-hlinitý granát dopovaný neodymem
Nd: YAP – $YAlO_3$	Yttrito-hlinitý perovskit dopovaný neodymem
n_p	Počet měřených pulsů
OC	Výstupní polopropustné (zrcadlo)
P_{ab}	Hustota pravděpodobnosti absorpce
PER	Extinkční poměr
p_{sp}	Hustota pravděpodobnosti spontánní emise
P_{st}	Hustota pravděpodobnosti stimulované emise
PV	Peak-to-valley
V	Objem kavity
WFD	Deformace vlnoplochy
ν	Frekvence
ν_m	Modulační frekvence
$\sigma(\nu)$	Účinný průřez interakce

1 Úvod

Laserové technologie se v dnešní době využívají pro širokou škálu aplikací. Díky specifickým vlastnostem laserového záření, jakými jsou koherence, vysoká monochromaticnost a nízká divergence, význam laserů neustále roste. Pevnolátkové lasery zde netvoří žádnou výjimku. Yttrito-hlinitý granát dopovaný ionty Nd^{3+} (Nd: YAG) je jedním z nejrozšířenějších typů aktivního média, využívající se pro pevnolátkové lasery.

Nd: YAG jako aktivní medium pevnolátkového laseru poprvé roku 1964 využil Joseph Edward Geusic s kolegy v Bellových laboratořích. Od té doby se Nd: YAG laser řadí mezi jeden z nejuniverzálnějších pevnolátkových laserů. Popularity dosáhl především díky svým fyzikálně-chemickým vlastnostem. Monokrystaly Nd: YAG jsou izotropní a vyznačují se poměrně nízkým radiálním gradientem koncentrace iontů Nd^{3+} . Matrice monokrystalu má vhodné mechanické vlastnosti, optickou kvalitu a tepelnou vodivost, čímž se jeví jako velice vhodná pro použití při generaci laserového záření.

Vysoký zisk i pro menší intenzity čerpání, nízký práh, který dovoluje použití v kontinuálním modu s výkonem stovek wattů či možnost využití Q-spínaného modu s výstupní energií laserového svazku v desítkách joulů... toto jsou jen některé přednosti, které zajistily rozšíření a popularitu Nd: YAG laseru v různých odvětvích. Nachází využití nejen při vědeckém bádání, ale také v široké škále medicínských zákroků, v průmyslu nebo ve vojenských aplikacích.

Díky vzrůstající popularitě a aplikačním možnostem, začaly markantně růst požadavky na optickou kvalitu laserových monokrystalů. Ruku v ruce s těmito požadavky jde samozřejmě fakt, že je nutné používat, případně vyvinout či zdokonalit účinné a adekvátní metody kontroly laserových monokrystalů. Myšlenka je prostá, čím lépe budou charakterizovány optické vlastnosti laserových monokrystalů, tím jednodušší bude nalézt parametry, které mají vliv na opakovatelnost jejich výroby.

Aby však bylo dosaženo vysoké optické kvality nejen laserových monokrystalů, ale především také jednotlivých laserových tyčí, které se z krystalů vyrábějí, je každá jednotlivá tyč podrobena optické kontrole. Optická kvalita laserové tyče může být ovlivněna, jak poruchami v samotném materiálu monokrystalu, tak také následným opracováním.

Doposud také nebyla vytvořena studie, která by sledovala korelaci parametrů laserových tyčí – deformaci vlnoplochy, extinkční poměr a typy poruch laserové tyče. Výskyt korelace mezi jednotlivými parametry by znamenal zajímavý poznatek pro samotnou výrobu laserových tyčí.

Z hlediska ekonomizace celého procesu, je důležité zařadit měření optické kontroly v různé fázi opracování laserové tyče. Pokud by bylo možno kvalifikovaně odhadnout, zda laserová tyč bude splňovat sledované parametry, již v rané fázi opracování, došlo by tak k brzké eliminaci opracování nekvalitních kusů. Z čehož vyplývá, že čím dříve bude možno nekvalitní kusy detekovat, tím více bude zefektivněna výroba laserových tyčí.

2 Teorie laserových krystalů

Teoretická část seznamuje se základními principy fungování laseru se zaměřením na lasery pevnolátkové. Dále se zabývá laserovými monokrystaly, jejich vlastnostmi a současnými metodami kontroly optické kvality laserových tyčí.

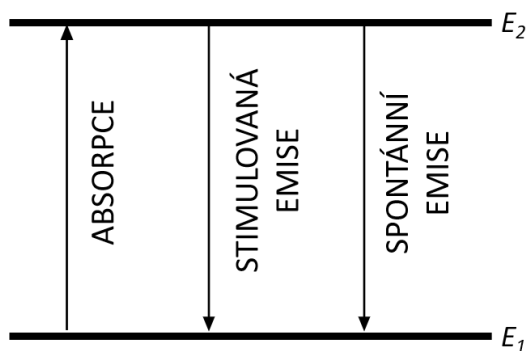
2.1 Interakce záření s atomy

Atom, jakožto kvantový systém s diskrétními stavy, může vyvolat absorpci (anihilaci) fotonu nebo jeho emisi (vytvoření). Tento jev je doprovázen přechodem valenčních elektronů mezi energetickými hladinami atomu (viz Obrázek 1). Při absorpci fotonu je elektron excitován z energetické hladiny E_1 na vyšší energetickou hladinu E_2 , zatímco při emisi fotonu, elektron přechází z vyšší energetické hladiny E_2 na nižší hladinu E_1 . Přechody mezi energetickými hladinami probíhají náhodně. [1, 2]

Energie vyzářeného/pohlčeného fotonu je rovna rozdílu energií energetických hladin, přičemž pro frekvence fotonu platí $\nu \approx \nu_0$

$$h \nu_0 = E_2 - E_1. \quad (2.1)$$

Existují tři elementární formy interakce záření a hmoty – absorpce, spontánní emise a stimulovaná emise. [1, 2]



Obrázek 1: Přechody mezi hladinami atomu [3]

2.1.1 Absorpce

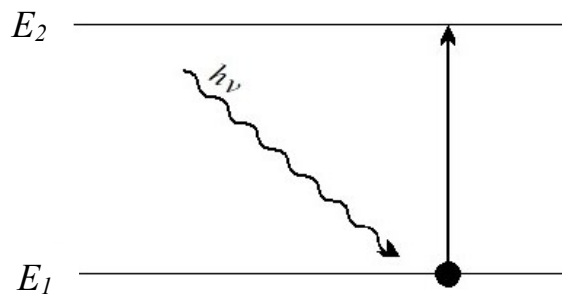
Absorpce je přechod valenčního elektronu na vyšší energetickou hladinu E_2 , který je indukován fotonem (Obrázek 2). K tomuto procesu může dojít, pokud se atom nachází na nižší energetické hladině E_1 a v zářivém módu se nachází alespoň jeden foton. [4]

Hustota pravděpodobnosti absorpce P_{ab} fotonů o frekvenci ν v kavitě o objemu V za předpokladu, že je atom ozářen n fotony daného módu je:

$$P_{ab} = n \frac{c}{V} \sigma(\nu) \quad (2.2)$$

Kde c je rychlost světla a $\sigma(\nu)$ je účinný průřez interakce. [1]

Účinný průřez přechodu $\sigma(\nu)$ je funkcí ν , $\sigma(\nu)$ lze vypočítat ze Schrödingerovy rovnice, ačkoliv častěji bývá určen experimentálně. [1]



Obrázek 2: Absorpce

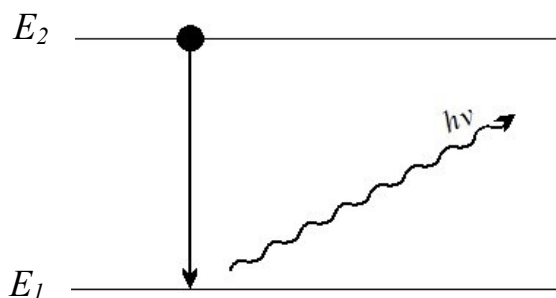
2.1.2 Spontánní emise

Pokud se atom nachází v excitovaném stavu (valenční elektron se nachází na vyšší energetické hladině E_2), může spontánně sestoupit na nižší energetickou hladinu (Obrázek 3). Přechod elektronu na nižší energetickou hladinu E_1 je doprovázen vyzářením energie ve formě fotonu, čímž dochází ke zvýšení energie daného elektromagnetického módu. Spontánní emise, je jev nezávislý na počtu již existujících fotonů v daném módu, tudíž pro každý mód existuje vlastní rovnice (2.3). [1]

Hustota pravděpodobnosti spontánní emise p_{sp} v kavitě s objemem V závisí na frekvenci ν . [1]

$$p_{sp} = \frac{c}{V} \sigma(\nu) \quad (2.3)$$

Kde c je rychlost světla a $\sigma(\nu)$ je účinný průřez interakce. [1]



Obrázek 3: Spontánní emise

2.1.3 Stimulovaná emise

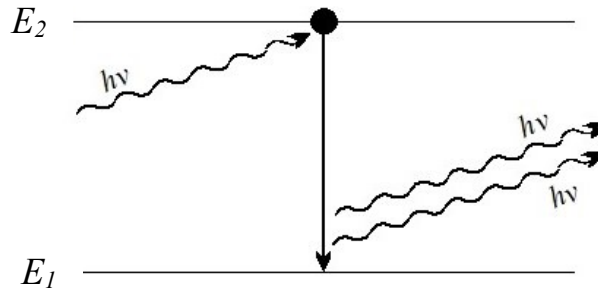
Pokud se atom nachází na vyšší energetické hladině E_2 může dojít k interakci s fotonem, který je schopen indukovat přechod atomu na nižší energetickou hladinu E_1 (Obrázek 4). Tento přechod je doprovázen vyzářením druhého fotonu. Oba fotony náleží do stejného módu, a tudíž jsou koherentní. [1]

Stimulovaná emise je inverzní jev absorpce. Foton se specifikovanou frekvencí, směrem šíření a polarizací stimuluje emisi duplicitního fotonu se stejnými vlastnostmi. Tato interakce je předpokladem pro fungování laserového zesilovače a laserů. [1, 5]

Hustota pravděpodobnosti stimulované emise jednoho fotonu do módu s n fotony v kavitě o objemu V je úměrná počtu interagujících fotonů n v konkrétním módu a účinnému průřezu přechodu $\sigma(\nu)$. [1]

$$P_{st} = n \frac{c}{V} \sigma(\nu), \quad (2.4)$$

kde c je rychlost světla a $\sigma(\nu)$ je účinný průřez interakce. [1]



Obrázek 4: Stimulovaná emise

2.2 Laser

Akronym LASER pochází z anglického „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což lze do češtiny přeložit jako: „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. [6]

Laser je zdroj elektromagnetického záření, které se vyznačuje tím, že je koherentní a monochromatické. Průměr stopy laserového svazku se pohybuje v řádu milimetrů a pro laserový svazek je také typická malá divergence v řádu miliradiánů. Divergence je parametr, který vyjadřuje, jak vzrůstá průměr svazku se vzdáleností od zdroje. [5]

Aby byl laser schopen generovat záření, je potřeba zpětné vazby, která je zajištěna optickým rezonátorem. Za běžných podmínek je světlo při průchodu látkou zeslabováno, pokud jsou populace elektronů na základní energetické hladině E_1 a excitační hladině E_2 stejné, světlo prochází látkou beze změny intenzity. Je-li dosaženo inverze populace (počet excitovaných elektronů nacházejících se na energetické hladině E_2 je vyšší než počet elektronů na základní energetické hladině E_1) intenzita světla exponenciálně narůstá a dochází k jejímu zesílení. [3]

Inverze populace může být dosaženo použitím aktivního media, kterému je dodávána energie pomocí zdroje čerpání. Aktivní medium je umístěno do dutiny rezonátoru, který zajistí zpětnou vazbu a tím dojde k vytvoření oscilátoru. [3]

2.2.1 Dělení laserů

Podle použitého aktivního media, lasery dělíme na:

- plynové – He-Ne laser
- kapalinové – barvivový laser (Rhodamin 6G)
- pevnolátkové – Nd: YAG laser
- polovodičové – GaAs laser
- lasery s volnými elektrony

Podle druhu činnosti:

- kontinuální
- pulsní – Q-spínaný laser

Podle počtu energetických hladin:

- tříhladinové – rubínový laser
- čtyřhladinové – Nd: YAG
- vícehladinové – plynový, barvivový laser

čerpáno z [7, 8]

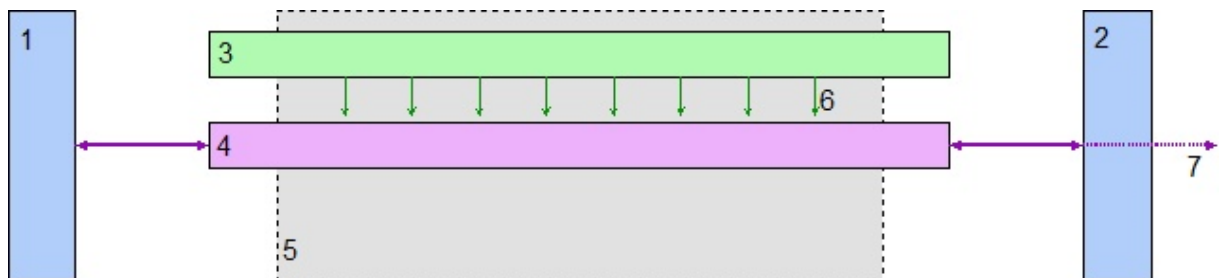
2.2.2 Optický zesilovač – aktivní medium

Aktivní medium obsahuje atomy se systémem energetických hladin vhodných pro stimulovanou emisi záření. Energie potřebná pro excitaci elektronů aktivního media je dodána prostřednictvím čerpání. Jakmile dojde k vytvoření inverze populace elektronů na horní energetické hladině, spontánně emitované fotony při průchodu aktivním medium způsobí indukci stimulované emise. Proces stimulované emise vyzáří dodanou energii ve formě laserového svazku. [3, 8]

2.2.3 Rezonátor

Aby bylo možné dosáhnout výše uvedeného jevu, je zapotřebí optického rezonátoru, který je tvořen dvojicí zrcadel, odrazným a polopropustným, mezi kterými je umístěno aktivní medium. Zrcadla mohou být planární či sférická. Použití pouze planárních

zrcadel však způsobuje nestabilitu, a proto se používá alespoň jedno zrcadlo sférické. Zrcadla jsou umístěna tak, aby kopírovala tvar vlnoplochy. Tvar vlnoplochy laserového svazku ovlivňují nehomogenity aktivního media, které mohou zapříčinit deformaci vlnoplochy, dochází tak ke snížení kvality a účinnosti laserového záření. Aby bylo vytvořeno laserové záření požadovaných parametrů, je potřeba ověřit, zda aktivní medium neobsahuje vnitřní nehomogenity a poruchy, které by mohly způsobit nežádoucí deformaci vlnoplochy výstupního laserového záření. [7, 9]



Obrázek 5: Schéma laserového rezonátoru: 1 – odrazné zrcadlo; 2 – polopropustné zrcadlo; 3 – zdroj čerpání; 4 – aktivní medium; 5 – rezonátor; 6 – čerpání; 7 – laserové záření

Foton, který je vyzářen pomocí spontánní emise mimo osu rezonátoru, je pohlcen okolím a neúčastní se zesilování záření. Avšak fotony, které se šíří v ose rezonátoru budou oscilovat mezi zrcadly a jejich počet bude neustále růst, jelikož budou indukovat stimulovanou emisi excitovaných elektronů v atomech aktivního media. Laser bude generovat záření pouze tehdy, bude-li zesílení světla za jeden oběh oscilátorem vyšší nežli ztráty. [8]

Elektromagnetické záření, které je emitováno většinou laserů je složeno z diskrétního počtu frekvencí. Interferencí elektromagnetických vln v dutině rezonátoru (Obrázek 5) dojde k ustálení elektromagnetického pole tzv. módů. Módy jsou tvořeny pouze zářeními o vlnových délkách λ , které splňují podmínku:

$$L = k \cdot \frac{\lambda}{2}, \text{ kde } k = 1, 2, 3 \dots, \quad (2.5)$$

kde L je délka optické kavity (rezonátoru). [5]

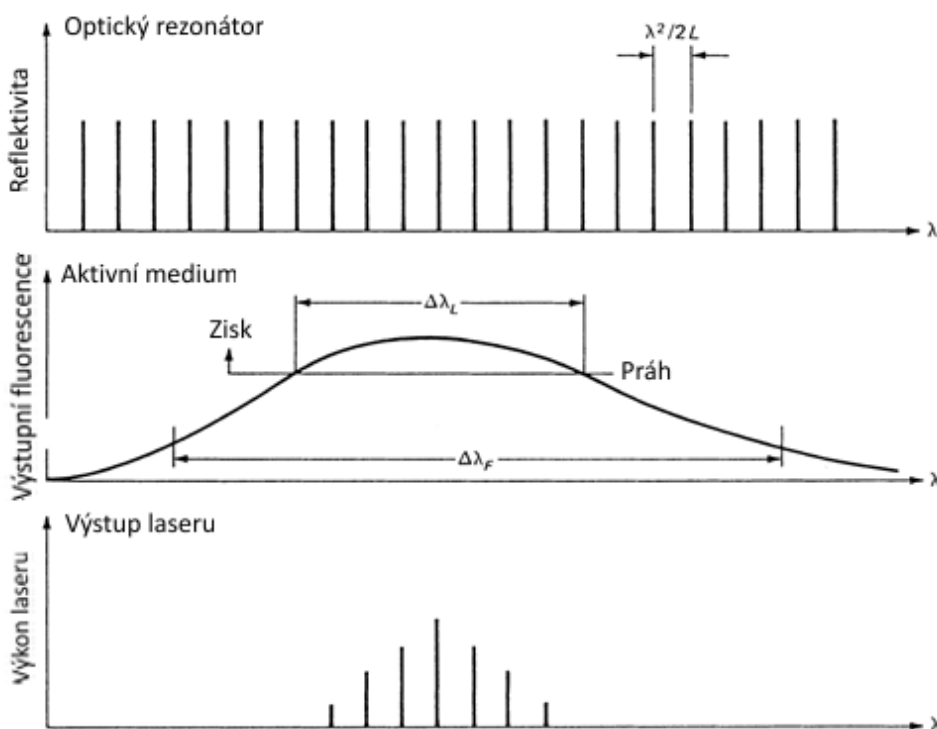
Dělení módů:

- Podélné (longitudinální)
- Příčné (transverzální) horizontální
- Příčné vertikální

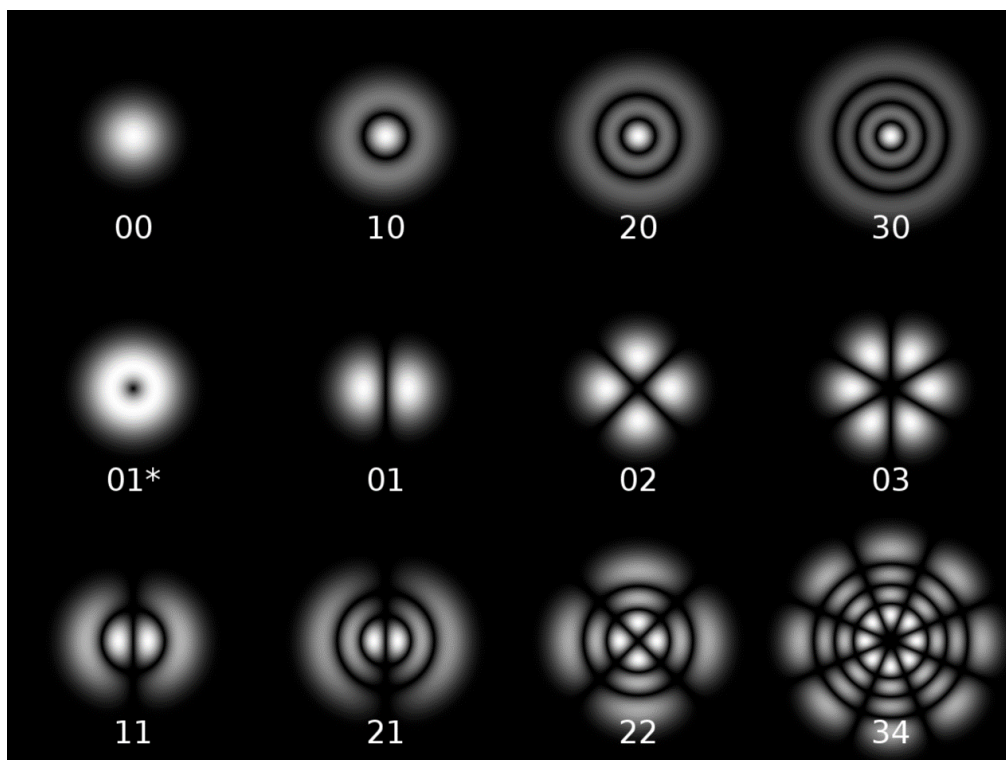
Základní vlnové spektrum laseru tvoří podélné módy. Příčné módy jsou zodpovědné za vyzařovací charakteristiku laseru a profil svazku, který je laserem emitován. [5]

Podélné módy (viz Obrázek 6) se jeden od druhého liší pouze frekvencí, na které oscilují, zatímco příčné módy (viz Obrázek 7 a Obrázek 8) se kromě rozdílné frekvence liší také intenzitou prostorové distribuce v ploše kolmé na směr šíření. Ke každému jednotlivému příčnému módu náleží podélné módy, jejichž prostorová distribuce intenzity odpovídá danému příčnému módu. [5]

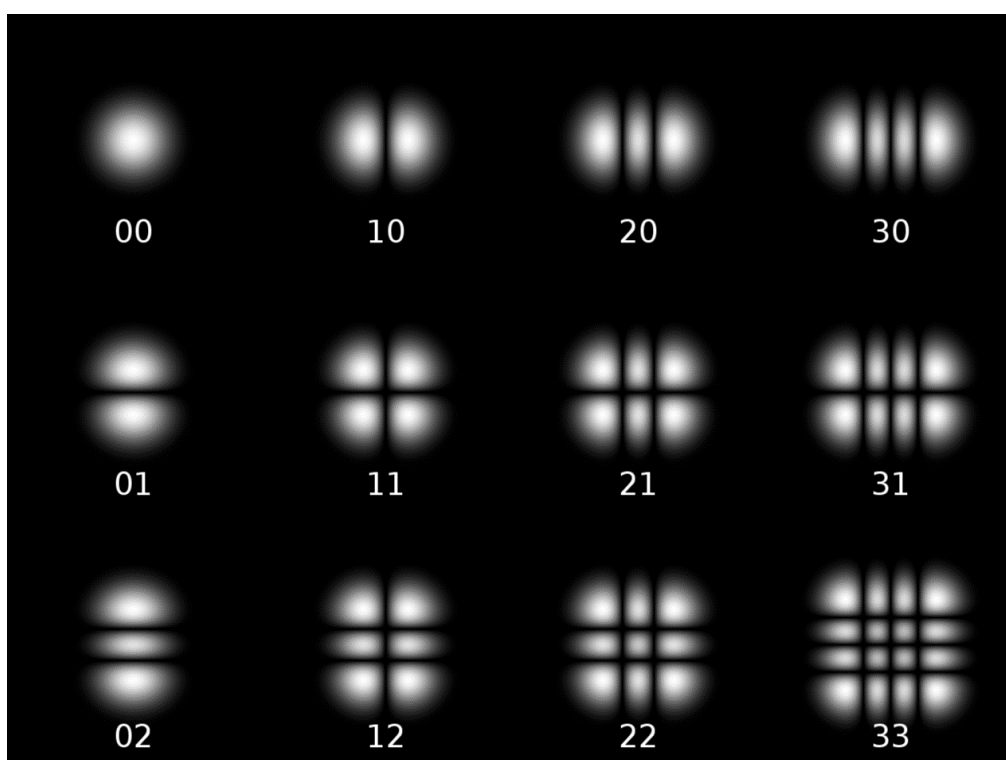
Jednotlivé módy, které jsou laserem generovány nemusí mít vždy navzájem korelované fáze. Pokud laser generuje mnoho navzájem nezávislých módů, výsledné záření má charakter fluktujícího (šumového) signálu. Střední hodnota intenzity elektrického pole tohoto záření je rovná nule, plošná hustota výkonu je však nenulová. [10]



Obrázek 6: Schematický diagram výstupního spektra laseru bez výběru módů převzato a upraveno z [5]



Obrázek 7: Rozložení příčných cylindrických módů [11]



Obrázek 8: Rozložení příčných obdélníkových módů [11]

2.2.4 Zdroj energie (čerpání)

Čerpáním v zesilovacím mediu vznikne inverze populace elektronů, čímž dojde k uložení energie v excitované energetické hladině. Pokud dojde k stimulované emisi, energie uložená v excitované energetické hladině se uvolní a dojde k zesílení. [5]

Aktivní medium je možné čerpat opticky, tak že je medium ozařováno výbojkou, diodou, případně jiným laserem. Dále je možné aktivní medium čerpat elektricky. V laseru s plynným aktivním mediem je excitace elektronů média způsobena srážkami atomů s elektrony elektrického výboje. [3]

2.2.5 Chlazení

Při čerpání aktivního media, dochází k přeměně části dodané energie na odpadní teplo. Aby nedošlo k destrukci materiálu, je nutné ho chladit. Díky nerovnoměrnému rozložení teploty uvnitř aktivního media, dochází k teplotním jevům v laserové tyči. Nehomogenní rozložení teploty vede ke vzniku napětí v materiálu. Následně mohou vzniknout dva nežádoucí jevy, jakými jsou vytvoření termické čočky a indukovaný dvojlom (původně izotropní materiál, se stává anizotropním). Aktivní medium by mělo dosahovat co nevyšší optické kvality, aby nedocházelo k zesilování nežádoucích jevů díky jeho optické nehomogenitě. [7, 12]

Nejčastěji se používá vodní chlazení nebo chlazení vzduchem. Při vodním chlazení může být teplo z vodního okruhu předáváno do vzduchu nebo je vytvořen druhý vodní okruh, do kterého je teplo z prvního okruhu předáváno ve výměníku. Pro menší diodově čerpané lasery bývá postačující chlazení vzduchem, kde je teplo kondukcí vedeno na kovový chladič, který má velkou plochu a teplo je z něho předáváno do okolního vzduchu. [5]

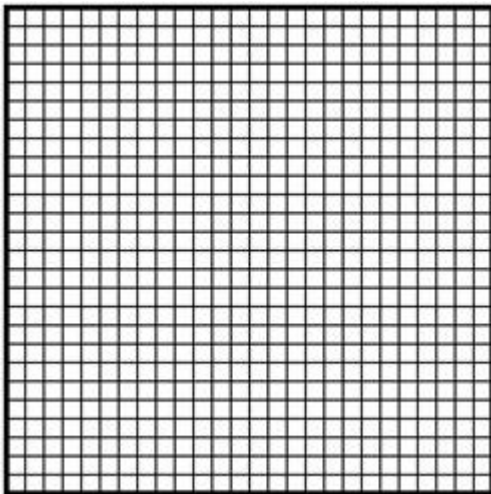
2.3 Laserové monokrystaly

Díky rozvoji technologie, zejména automatizace kontroly růstu krystalů, je v dnešní době možné pěstovat monokrystaly s minimálním počtem poruch s vysokou výtěžností, a také lze velice přesně charakterizovat jejich fyzikální vlastnosti. [13]

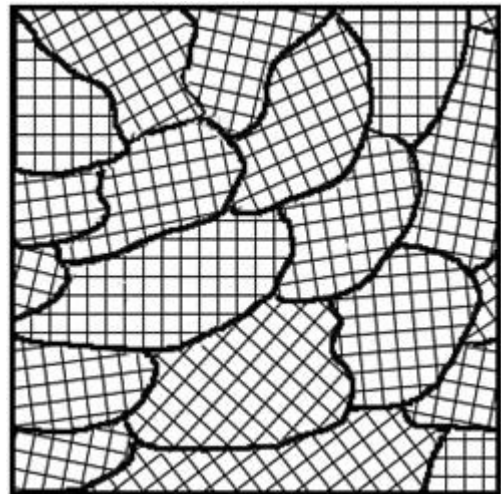
2.3.1 Monokrystal

Monokrystal je makroskopický krystal se zanedbatelnými poruchami krystalové mřížky. Uspořádání jeho základních strukturních jednotek (atomy, ionty, molekuly) je zachováno i v makroskopickém měřítku, jejich uspořádání se v prostoru periodicky opakuje. Jelikož uspořádání strukturních jednotek je pravidelné, tak i monokrystal vytváří pravidelný geometrický tvar. Polykrystal se od monokrystalu liší tím, že se skládá z velkého počtu zrn, ačkoliv jsou základní strukturní jednotky v zrnech uspořádány pravidelně, poloha zrn v polykrystalu je náhodná. [14]

Rozdíl struktur monokrystalu a polykrystalu je vidět na Obrázku 9 a Obrázku 10.



Obrázek 9: Struktura monokrystalu [14]



Obrázek 10: Struktura polykrystalu [14]

Polykrystaly jsou izotropní látky, to znamená, že mají ve všech směrech stejné vlastnosti, což je způsobeno náhodnou orientací zrn. Naproti tomu monokrystaly jsou látky, které se vyznačují svou anizotropií. To znamená, že některé fyzikální vlastnosti těchto krystalů mohou být směrově závislé vzhledem k tvaru krystalické mřížky. [14]

2.3.2 Pěstování monokrystalů

Princip pěstování monokrystalů je založen na změně rovnovážného stavu systému. Růst krystalů může probíhat jak z pevné, kapalně, tak i z plynné fáze. K pěstování z taveniny se používají metody kelímkové nebo bez-kelímkové. [13]

Kelímkové metody pěstování monokrystalu:

- Czochralskiho metoda
- Bridgmanova metoda
- Stockbargerova metoda
- Zonální tavba

Bezkelímkové metody pěstování monokrystalu:

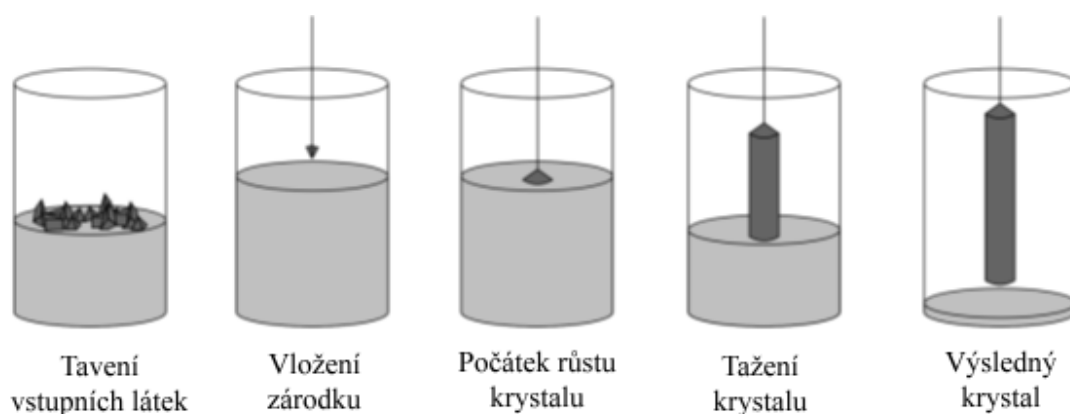
- Verneuilova metoda
- Metoda plovoucí zóny

Nejběžnější metodou pro pěstování laserových monokrystalů je pěstování z kapalně fáze Czochralskiho metodou. Tato metoda je taktéž nazývána, jako metoda tažení na zárodku a řadí se mezi metody kelímkové (viz Obrázek 11). [13]

Kelímk je vyroben typicky z iridia nebo molybdenu, tyto kovy se používají díky svému vysokému bodu tání. Teplota tání iridia je 2410 °C [15] a teplota tání molybdenu je 2617 °C. [16] Kelímk, do kterého se umístí vsázka – směs práškových oxidů vstupních látek, se vloží do pěstovací pece, kde může být ohříván odporově nebo indukčně. [17]

Před samotným započítím pěstování krystalu se odebere vzorek taveniny, který zůstane umístěný v peci až do ukončení pěstovacího procesu. Vzorek taveniny se z pece vytáhne, až společně s vypěstovaným krystalem a následně se vyhodnotí jeho složení pomocí rentgenfluorescenční spektrometrie.

Po odebrání vzorku z taveniny, která vznikla v kelímku ze vstupních látek, se do taveniny ponoří zárodek, jehož krystalová mřížka je přesně orientovaná. Zárodek se otáčí kolem své osy a postupně se vytahuje z taveniny ven, přičemž na něm začíná postupně růst monokrystal. V momentě, kdy má monokrystal požadovanou délku, dojde k ukončení pěstovacího procesu, pec se nechá vychladnout a monokrystal se z ní poté vytáhne. [18]



Obrázek 11: Schéma Czochralskiho metody
převzato a upraveno z [19]

Typické podmínky při pěstování monokrystalu Nd: YAG Czochralskiho metodou:

- rychlost růstu monokrystalu: 0,4 mm/h,
- rychlost otáčení zárodku: 20 rpm,
- teploty se pohybují kolem 2100 K. [20]

2.3.3 Distribuční koeficient

Distribuční koeficient příměsi k patří mezi důležité parametry v technologii pěstování krystalů.

$$c_S = k \cdot c_L \quad (2.6)$$

Kde k je distribuční koeficient, c_S je koncentrace příměsi v krystalu a c_L je koncentrace příměsi v tavenině. [18, 21]

Distribuční koeficient v podstatě vyjadřuje míru ochoty příměsi zabudovávat se do krystalu. Jestliže je $k < 1$, koncentrace příměsi v krystalu je menší než v tavenině a v blízkosti rozhraní dochází k hromadění příměsi. Pokud je však $k > 1$ koncentrace příměsi v krystalu je vyšší než v tavenině a dochází k ochuzování taveniny o příměs. [18, 21, 22]

Například nedopovaný krystal $Y_3Al_5O_{12}$ (dále pouze YAG) pěstovaný z iridiového kelímku v dusíkové atmosféře s obsahem 300–1000 ppm kyslíku může růst rychlostí až 1 cm/h. Avšak pokud se bude YAG pěstovat s příměsí Nd^{3+} , dojde ke zpomalení růstu na 0,5 mm/h. Je to způsobeno nízkým distribučním koeficientem Nd^{3+} , který nabývá hodnot ($k = 0,16-0,18$). Nízký distribuční koeficient Nd^{3+} , také způsobuje neuniformní rozložení koncentrace Nd^{3+} v axiálním směru Nd: YAG krystalu. Jelikož iont Nd^{3+} je větší než iont Y^{3+} , primárně preferuje setrvání v tavenině, a tudíž se neochotně zabudovává do YAG na místo yttria [21, 22]

2.3.4 Poruchy, defekty monokrystalů

Ačkoliv by bylo velice žádoucí, aby bylo možno pěstovat monokrystal bez jakýchkoliv poruch, v praxi toho nelze dosáhnout. Každý reálný monokrystal vykazuje určité množství poruch ve své krystalové mřížce. Poruchy se často dělí podle prostorového rozložení na poruchy bodové, čárové, plošné a objemové. [23]

Pro laserovou techniku je velice důležité stanovit poruchy krystalové mřížky použitého monokrystalu, jelikož tyto poruchy mohou nepříznivě ovlivnit chování laseru. Během procesu pěstování mohou v laserovém monokrystalu vznikat bublinky, praskliny a prasklinky, případně inkluze částic materiálu kelímku nebo částic/molekul atmosféry přítomné v peci při pěstování. Inkluze mohou absorbovat laserové záření, v důsledku čehož dochází k lokálnímu zvyšování teploty a tavení okolní matrice doprovázené koncentrací napětí, které může způsobit až destrukci materiálu. K dalším důsledkům poruch monokrystalu patří nehomogenní rozšíření spektrální čáry laseru, samofokusace a snižování extinkčního poměru. [5]

Jedním ze způsobů ověření optické homogenity materiálu, který se v praxi používá, je měření deformace vlnoplochy prošlého záření skrze materiál. Deformace vlnoplochy se určuje pomocí chyby peak-to-valley (PV) vlnoplochy po průchodu optickým elementem vzhledem k referenční vlnoploše. [24]

2.3.5 Kontrola defektů vypěstovaného monokrystalu

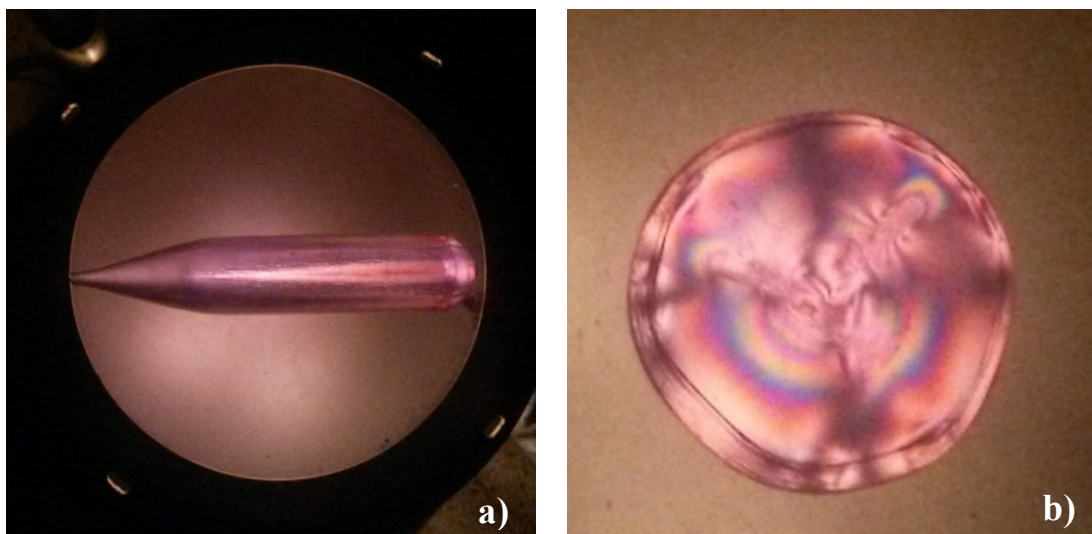
Kontrola laserového monokrystalu je nedílnou součástí procesu výroby laserových tyčí. Výskyt defektů a jejich rozložení v monokrystalu ovlivňuje jeho mechanické a optické

vlastnosti. Pro zajištění vysoké kvality je nutné identifikovat původ, koncentraci a distribuci poruch v krystalu. [25]

Optická kontrola:

Optická kontrola je běžná, nenáročná a neinvazivní metoda, proto se hojně užívá jako prvotní kontrola laserového krystalu. Je schopná odhalit bubliny, praskliny a další rozptylová centra, která jsou detekována díky ozáření intenzivním bílým světlem, respektive laserovým svazkem. [25]

Dále se provádí kontrola v polariskopu, který je tvořen lampou a zkříženými polarizátory, mezi které se umístí krystal. V monokrystalu mezi zkříženými polarizátory lze pozorovat interferenční barvy (viz Obrázek 12) v důsledku přítomnosti dvojlomu, který je indukován poruchami nebo vnitřním zbytkovým napětím, které se u každého krystalu pěstovaného Czochralskiho metodou vyskytuje uprostřed, podél jeho osy. Tento jev je způsoben metodou pěstování, nedá se mu zcela zabránit, pouze vhodnou volbou pěstovacích podmínek ho lze zmírnit.

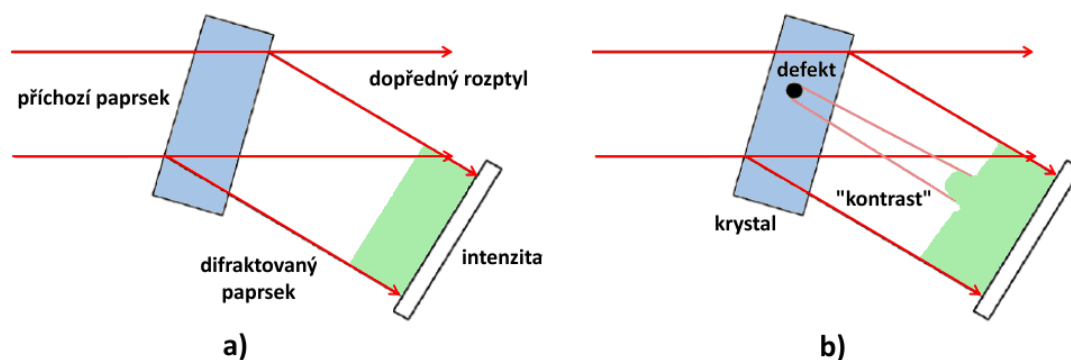


Obrázek 12: Monokrystal umístěný v polariskopu: a) zbytkové vnitřní pnutí podél osy monokrystalu; b) monokrystal se seříznutými čely

Metody s využitím rentgenového záření:

Rentgenová topografie se využívá ke studiu krystalových poruch o malé hustotě. Tato metoda využívá difrakce rentgenového záření na mřížce krystalu. Pokud by byl monokrystal zcela uniformní, difraktované paprsky z každého bodu krystalu, by se

vyznačovaly totožnou intenzitou (Obrázek 13a), která se zachycuje na snímek – topogram. Poruchy v krystalu způsobí, že difraktovaný rentgenový svazek bude mít odlišnou intenzitu – dochází k vytvoření topografického kontrastu (Obrázek 13b), jehož analýzou lze identifikovat různé druhy poruch. [25, 26]



Obrázek 13: Princip rentgenové topografie s využitím roztaženého svazku:
 a) situace pro ideální krystal; b) situace pro krystal s defektem
 převzato a upraveno z [27]

2.4 Typy laserových monokrystalů

2.4.1 Rubín

Oxid hlinitý dopovaný chromem (Cr^{3+} : Al_2O_3) je materiál, který byl v roce 1960 jako první použit pro konstrukci laseru. Jedná se však o tříhladinový systém, tudíž k vytvoření inverzní populace je potřeba velice intenzivního čerpání. Rubínový laser má velice nízkou účinnost, a proto se dnes již nevyužívá. [5]

2.4.2 Nd: YAG

Yttrito-hlinitý granát dopovaný neodymem (Nd^{3+} : $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, dále jen Nd: YAG) je v dnešní době nejpoužívanější typ pevnolátkového laseru. Jedná se o izotropní krystal, který krystalizuje v kubické soustavě a má světle fialovou barvu. Energetické spektrum hladin Nd: YAG laseru odpovídá čtyřhladinovému modelu. Lasery se používají jak v kontinuálním, tak pulsním režimu. Nd: YAG lasery mají uplatnění jak

v průmyslových aplikacích (vrtání, sváření, řezání...), tak také v lékařství (oční mikrochirurgie, odstraňování tetování a ochlupení). [10]

Nd: YAG je významný materiál pro výrobu laserů díky obsahu Nd^{3+} iontů, které zprostředkovávají interkonfigurační přechody, jejichž zásluhou dochází k intenzivní infračervené emisi záření. Má intenzivní fluorescenční čáry na 900 nm a 1064 nm díky přechodům ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ a ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$. [29, 30]

Zvyšování koncentrace Nd^{3+} v monokrystalu má za následek zvýšení absorpčního koeficientu, snížení životnosti fluorescence a zvýšení celkové laserovací efektivity. Zároveň však zvyšování koncentrace Nd^{3+} v monokrystalu má za následek zvýšení pravděpodobnosti prasknutí monokrystalu v průběhu pěstování. Koncentrace Nd^{3+} iontů v komerčně prodávaných Nd: YAG monokrystalech se pohybuje v rozmezí 0–1,5 substitučních % za ionty ytterbia. [31]



Obrázek 14: Monokrystal Nd: YAG

2.4.3 Nd: YAP

Yttrito-hlinitý perovskit (yttrium-orthoaluminát) dopovaný neodymem (Nd^{3+} : YAlO_3). Jeho význam v dnešní době stoupá. Od Nd: YAG se liší svou krystalovou strukturou, která je orthorombická, což znamená, že jde o krystal anizotropní. Jeho výhodou je fakt, že roste rychleji než Nd: YAG. [10, 28]

Tabulka 1: Vlastnosti Nd: YAG a Nd: YAP [32, 33]

	<i>Nd: YAG</i>	<i>Nd: YAP</i>
<i>Matrice</i>	Yttrito hlinitý granát	Yttrito hlinitý perovskit
<i>Chemický vzorec</i>	$Y_3Al_5O_{12}$	$YAlO_3$
<i>Příměs</i>	Nd^{3+}	Nd^{3+}
<i>Krystalová struktura</i>	kubická	orthorombická
<i>Tvrдость podle Mohse</i>	8,25	8,5
<i>Tvrдость podle Knoop</i>	1215	1310
<i>Teplota tání</i>	1970 °C	1875 °C
<i>Hustota</i>	4,56 g/cm ³	5,35 g/cm ³
<i>Mřížková konstanta</i>	$a_0 = 1,201 \text{ nm}$	$a_0 = 0,518 \text{ nm}$ $b_0 = 0,531 \text{ nm}$ $c_0 = 0,736 \text{ nm}$
<i>Index lomu pro 1064 nm</i>	1,816	1,914 (n_a) 1,925 (n_b) 1,940 (n_c)
<i>Laserovací vlnová délka</i>	946 nm, 1064 nm, 1319 nm, 1444 nm	930 nm, 1079 nm, 1340 nm, 1432 nm

3 Současné metody optické kontroly kvality laserových tyčí

3.1 Laserová tyč

Laserová tyč, je pevnolátkové medium ve tvaru válce, které se používá jako aktivní medium pevnolátkového laseru. Průměr tyče se pohybuje v rozmezí 2–12 mm a délka může dosahovat až 160 mm. [32]

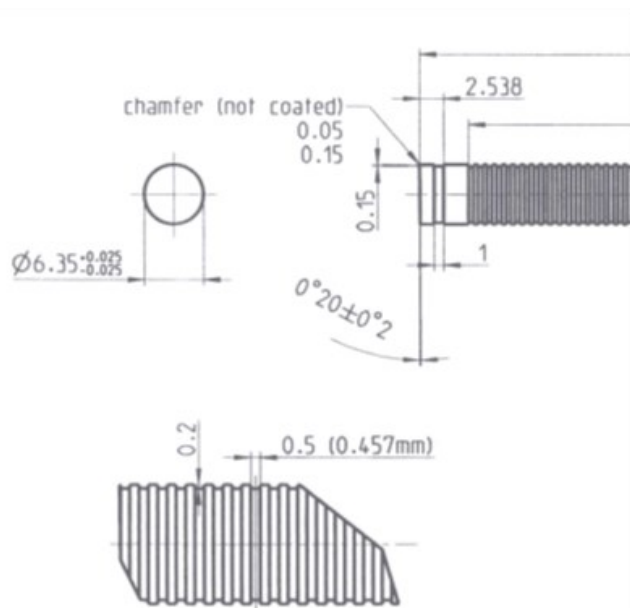


Obrázek 15: Laserové tyče (drážkovaná tyč – druhá zleva) [34]

Laserová tyč se nejprve z monokrystalu vyvrtá diamantovým vrtákem s vodním chlazením. Následně se temperuje při teplotách pod jejím bodem tání s cílem odstranit barevná centra, která byla v materiálu přítomná po vypěstování krystalu. Dalším cílem temperace je odstranění mechanicky indukovaného pnutí ve vyvrtaných tyčích. Následně dochází k dalšímu opracování.

Nejprve se opracovává plášť laserové tyče, který se ve většině případů brousí, respektive leští. Ve speciálních případech intenzivně Q-spínaných laserů se na broušeném plášti vytváří struktura drážek (Obrázek 15, Obrázek 16 – drážky o šířce 0,5 mm) s cílem potlačit nežádoucí oscilace podél pláště aktivního média (ring oscillations). Dále se také vytváří jedna větší drážka v blízkosti čela laserové tyče

(Obrázek 16 – drážka o šířce 1 mm). Účelem této drážky, je vymežit čistou aktivní aperturu aktivního prostředí tak, aby nedošlo k laserem indukovanému poškození okraje leštěné čelní plochy.



**Obrázek 16: Standardní provedení drážkovaného povrchu laserové tyče
Nd:YAG 6,35 x 109 mm CRYTUR**

Leštěný plášť laserových tyčí je zpravidla využíván v diodově čerpaných laserech. Ve speciálních případech je vzhledem k lepší distribuci čerpacího záření kombinován leštěný plášť s definovaně broušenými oblastmi.

Následně jsou broušeny a poté leštěny čela tyče a jejich fazety. Takto opracovanou tyč je nutné opatřit atestem kvality, zda vyhovuje požadovaným parametrům. Proto se pomocí interferometru měří rovnoběžnost čel tyče a deformace vlnoplochy, kterou tyč po průchodu laserového svazku způsobí. Mezi další zkoumané parametry patří extinkční poměr, profil koncentrace neodymu v tyči a výstupní energie laserového svazku při zadané energii čerpání.

Výsledné laserové tyče mohou být jednoduché nebo bondované (tyč se skládá z více segmentů, každý segment má jinou koncentraci příměsi), jejich povrch může být definovaně broušený nebo vroubkovaný. Záleží na jejich budoucí aplikaci (viz výše).

Tato kapitola byla zpracována na základě [35]

3.1.1 Temperace

Temperace laserových tyčí probíhá v kontrolovaných podmínkách. Může probíhat v redukční atmosféře (vodík H_2), oxidační atmosféře (kyslík O_2) nebo ve vakuu. Temperace probíhá za vysoké teploty, těsně pod teplotou tání monokrystalu. Za těchto podmínek dochází k redukci výskytu barevných center (bodové poruchy materiálu), které se vytvořily během růstu monokrystalu. Tento proces má za následek zlepšení optické jakosti laserové tyče. Především se používá pro zajištění minimálního absorpčního koeficientu při vlnové délce, na které daný laser emituje záření. [36]

3.2 Vizuální kontrola homogenity laserové tyče

Kontrola homogenity laserové tyče je metoda využívající se k vizualizaci poruch a pnutí v materiálu. Laserová tyč je umístěna do polariskopu (Obrázek 17) mezi zkřížené polarizátory, které jsou prosvíceny zdrojem bílého světla. Pomocí zvětšovací optiky lze přes okulár pozorovat interferenční barvy. Tyto barvy vznikají po průchodu polarizovaného světla laserovou tyčí, v jejímž materiálu se nacházejí poruchy, které indukují vznik dvojlomu.



Obrázek 17: Polariskop: 1. okulár; 2. makrošroub; 3. polarizátor; 4. prizma pro umístění tyče; 5. polarizátor; 6. lampa

3.3 Měření extinkčního poměru

Extinkční poměr je definován jako poměr výkonu P_{\parallel} , který je transmitován přes materiál umístěný mezi paralelními polarizátory a výkonu P_{\perp} , který je transmitován přes materiál umístěný mezi zkříženými polarizátory.

$$PER = 10 \log_{10} \frac{P_{\parallel}}{P_{\perp}} [dB] \quad (3.1)$$

Kde PER – extinkční poměr (polarization extinction ratio). [37]

Hodnoty extinkčního poměru se typicky uvádějí v decibelech.

Extinkční poměr se používá k charakterizaci laserových tyčí, jelikož je schopný reflektovat vnitřní pnutí, případně další nedokonalosti materiálu, které mohou způsobovat dvojlom. Dvojlomný materiál může mít vliv na deformaci vlnoplochy a změnu polarizace záření. Z rovnice (3.1) vyplývá, že materiál s vyšším naměřeným výkonem P_{\perp} bude mít nižší extinkční poměr, tudíž tento materiál nebude dokonale homogenní a bude více depolarizovat záření. [38]

Depolarizace záření je jedním z důležitých faktorů, který ovlivňuje stabilitu a výstupní energii pulzu Q-spínaného laseru s pasivním spínáním, a to především při vysokoenergetickém čerpání. [39]

3.4 Interferometrická měření

Interferometr je přístroj, který pro své fungování využívá principu interference světla. Využívá se pro měření povrchů, tloušťky, drsnosti povrchu, homogenity materiálů a mimo jiné také vzdáleností. Rozlišení interferometru se pohybuje v řádů nanometrů. Vyhodnocení vlastností zkoumaného vzorku dochází na základě vytvořeného interferogramu. Dvousvazkové interferometry poskytují informaci o rozdílu optické dráhy dvou svazků. Absolutní interferometrická měření jsou také možná, ale velice náročná na kalibraci a charakterizaci celého systému interferometru. [40]

3.4.1 Deformace vlnoplochy

K deformaci vlnoplochy dochází po průchodu záření materiálem, který má nehomogenní rozložení indexu lomu. Další příčinou deformace vlnoplochy může být také průchod záření přes rozhraní zkoumaného materiálu a okolního prostředí, v případě laserové tyče jsou za rozhraní považována její čela. Pokud je povrch čel laserové tyče správně vyleštěný, deformace vlnoplochy způsobená průchodem přes tato rozhraní je vzhledem k deformacím, které vytváří nehomogenity materiálu, zanedbatelná. [41]

V praxi se pro měření deformace vlnoplochy nejčastěji využívá interferometrického principu. V optickém průmyslu se používají interferometry Twyman-Greenova nebo Fizeauova typu. Tvar měřené vlnoplochy je vyhodnocen z hodnoty intenzity detekovaného interferenčního pole. Tato interferometrická měření jsou velice přesná (v řádu nanometrů), avšak také velice citlivá na okolní podmínky měření, zejména mechanické vibrace a teplotní fluktuace v měřicí oblasti. [42]

Výsledkem interferometrického měření laserové tyče je interferogram, který zobrazuje deformaci vlnoplochy záření po průchodu nečerpanou laserovou tyčí. Pro kvantitativní vyjádření deformace vlnoplochy se používá hodnota PV. [43]

3.4.2 Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr byl prvním sestaveným interferometrem, který navrhl a sestavil Albert Abraham Michelson roku 1881. Schéma tohoto interferometru je zobrazeno na Obrázku 18. Laserový svazek L je rozdělen děličem BS na dva svazky, které se odrážejí od zrcadel $M1$ a $M2$, přičemž zrcadlo $M1$ je pohyblivé. Svazky se po průchodu děličem rekombinují a jejich interference v podobě interferogramu je zachycena detektorem D . [44, 45]

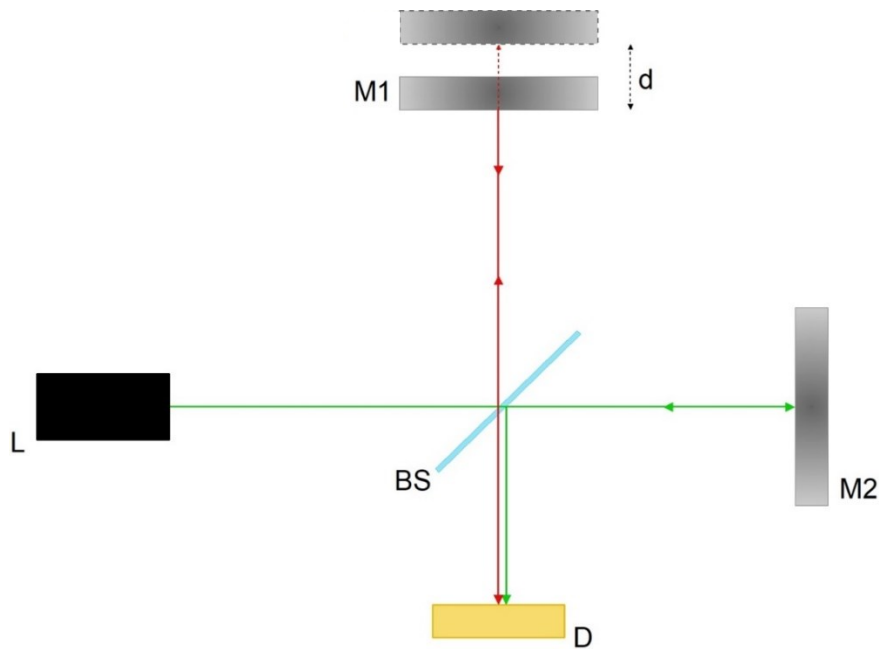
Pokud je zrcadlo $M1$ posunuto o vzdálenost d , Δd se nazývá dráhový rozdíl optické dráhy.

$$\Delta d = 2d \quad (3.2)$$

Velikost dráhového rozdílu vypovídá o tom, zda bude vznikat interferenční maximum (3.3) nebo minimum (3.4).

$$\Delta d = k \lambda \quad (3.3)$$

$$\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (3.4)$$



Obrázek 18: Michelsonův interferometr:
L – laser; BS – dělič svazků; M1, M2 – zrcadla; D – detektor

3.4.3 Mach–Zehnderův interferometr

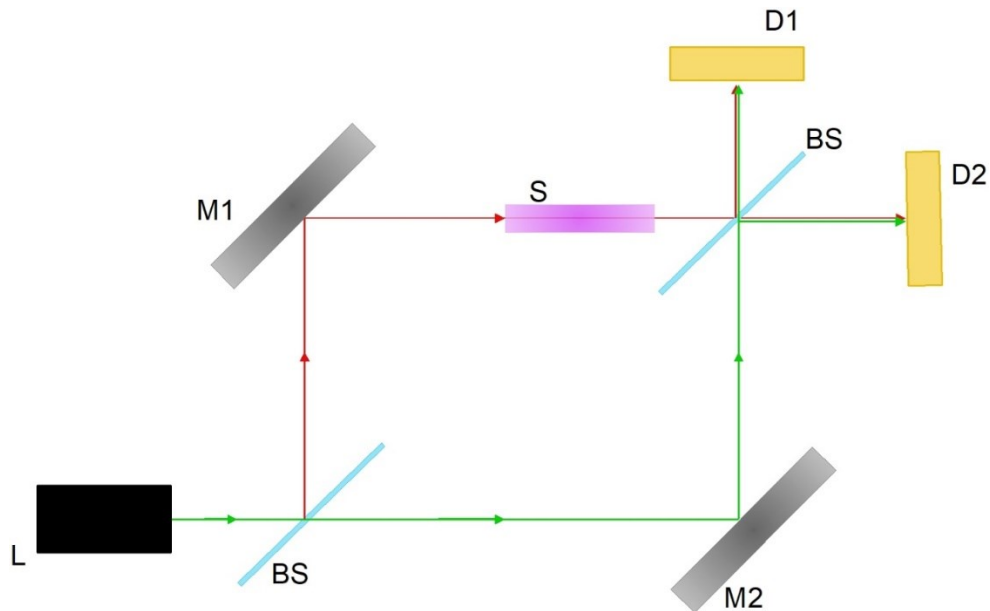
Schéma Mach–Zehnderova interferometru je zobrazeno na Obrázku 19. Mach–Zehnderův interferometr využívá dvou děličů svazků *BS* a dvou zrcadel *M1* a *M2*. Laserový svazek *L* je na děliči *BS* rozdělen na dva svazky, které jsou následně rekombinovány po odrazech na zrcadlech *M1* a *M2* a po průchodu druhým děličem svazku *BS*. Optické komponenty jsou umístěny v takové konfiguraci, že dráhy rozdělených svazků tvoří obdélník. [44, 46]

Mach–Zehnderův interferometr je vhodný pro testování jednorůchodové transmise vzorku. Vzorek *S* je umístěn do jednoho ramena rozděleného svazku. Měřením transmise vzorku lze ověřit homogenitu indexu lomu, případně homogenní rozložení tloušťky celého vzorku. [40]

Fázový rozdíl $\Delta\phi$ vlnoplochy W_r (referenční) a vlnoplochy W_m (měřená) je

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} nd, \quad (3.5)$$

kde d je rozdíl mezi W_r a W_m po průchodu vzorkem S a n je index lomu vzorku. [44]



Obrázek 19: Mach–Zehnderův interferometr:

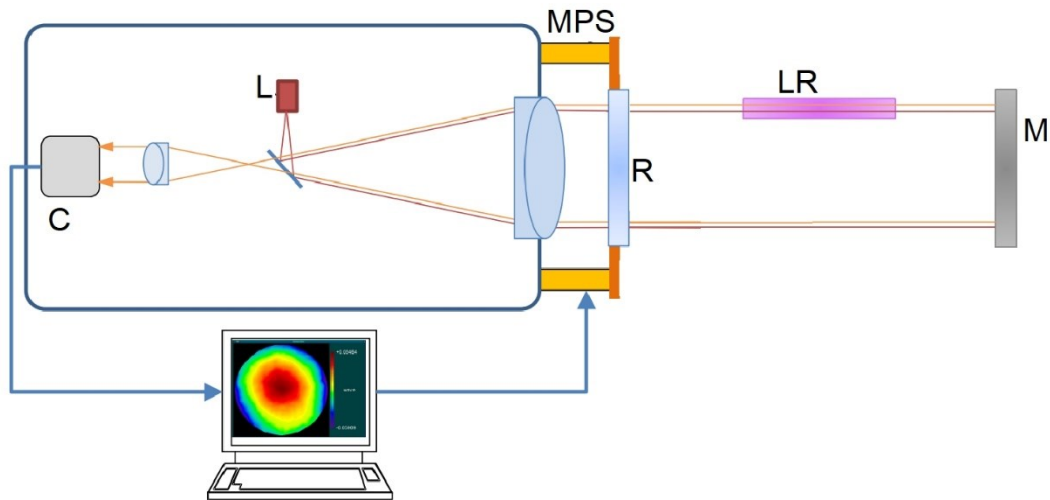
L – laser; BS – dělič svazku; M1, M2 – zrcadla; D1, D2 – detektory; S – měřený vzorek

3.4.4 Zygo interferometr

Zygo interferometr má uspořádání Fizeau interferometru s dvojitým průchodem laserového svazku (Obrázek 20). Zdrojem záření je He-Ne laser s vlnovou délkou $\lambda = 632,8$ nm. Laserový svazek je veden do kavity, ve které je umístěná referenční plocha R , laserová tyč LR (měřený prvek) a zrcadlo M . Průměr laserového svazku je pomocí optického teleskopu zvětšen tak, aby část svazku procházela laserovou tyčí a část procházela mimo tyč – referenční záření. Svazek je následně odražen od zrcadla, prochází zpět po stejné dráze a dopadá na referenční plochu. Kamera snímá interferenci záření z kavity s referenční plochou. [47]

Aby bylo možné vyhodnotit deformaci vlnoplochy a rovinnost čel, na vzniklém interferenčním obrazci je vybrána referenční a měřicí oblast pomocí masek. Měřicí maska vymezuje plochu tyče a referenční maska je umístěna mimo oblast laserové tyče,

a tudíž sleduje pouze interferenci záření odraženého od zrcadla s referenční plochou. [47]

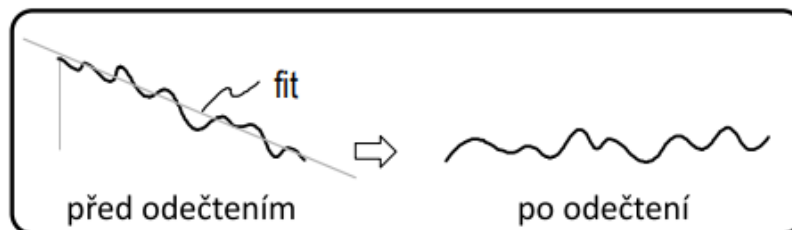


Obrázek 20: Fizeau interferometr: C – kamera; L – laser; MPS – mechanický fázový posun; R – referenční plocha; LR – laserová tyč; M – zrcadlo
převzato a upraveno z [48]

Kompenzace aberací:

Zygo interferometr je schopen pracovat v několika modech: Normální, Zernikeho, Cylindrický a Sférický. Jednotlivé mody se liší možnými typy aberací, které lze během analýzy odečítat. Pokud by nebyla odečtena aberace, která charakterizuje globální tvar zkoumaného povrchu, je pravděpodobné, že by tato aberace převládala a bylo by velice komplikované určit skutečnou kvalitu povrchu (nebo transmitované vlnoplochy). [47]

Odečtení aberace se provádí fitem funkce do naměřených dat metodou nejmenších čtverců. V normálním modu lze odečítat čtyři typy aberací, které jsou uvedeny v Tabulce 2. [47]

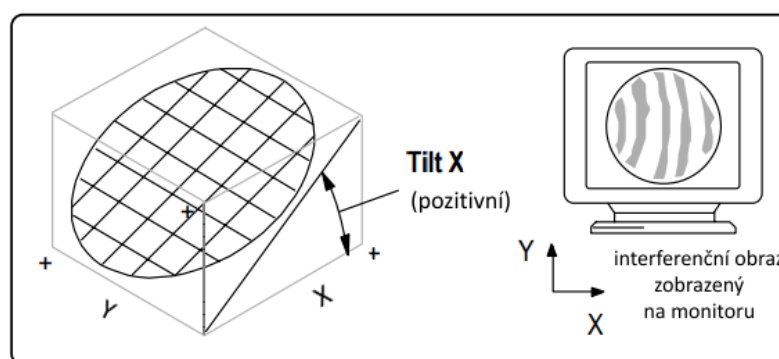


Obrázek 21: Ilustrace odečtení aberace
převzato a upraveno z [47]

Tabulka 2: Typy aberací, které lze kompenzovat v Normálním modu Zygo interferometru [47]

Zkratka aberace	Celý název aberace	Popis funkce odečtení aberace
PST	Piston	Posouvá nebo kompenzuje data v ose z
TLT	Tilt	Odstraňuje sklon
PWR	Power	Kompenzuje zakřivení sférických povrchů
AST	Astigmatism	Kompenzuje zakřivení astigmatických nebo cylindrických povrchů

- **TLT** – míra náklonu povrchu v obou směrech X a Y . Ilustrace náklonu ve směru X a interferenční obraz, který vzniká díky tomuto jevu je na Obrázku 22. [47]



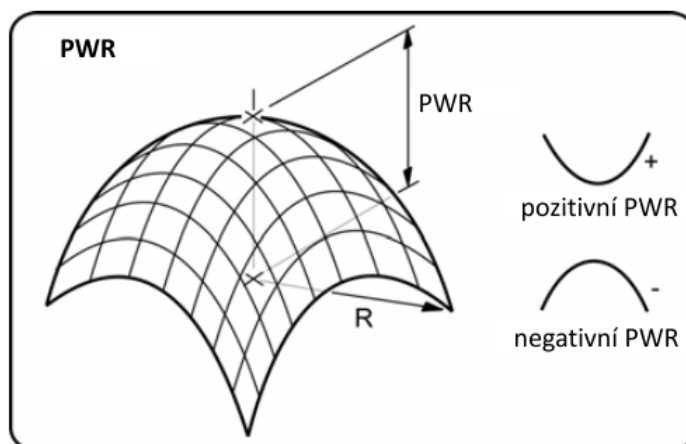
Obrázek 22: Ilustrace TLT
převzato a upraveno z [47]

- **PWR** – míra zakřivení povrchu/vlnoplochy bez rozlišení mezi dimenzemi X a Y . Je ekvivalentní výškovému rozdílu mezi středem a bodem plochy nejdál od středu (Obrázek 23). PWR je odvozený od nejlépe fitující sférické plochy, která je popsána rovnicí (3.6), PWR lze vypočítat pomocí vztahu (3.7). [47]

$$Z(X,Y) = C_0 + C_1X + C_2Y + C_3(X^2 + Y^2) \quad (3.6)$$

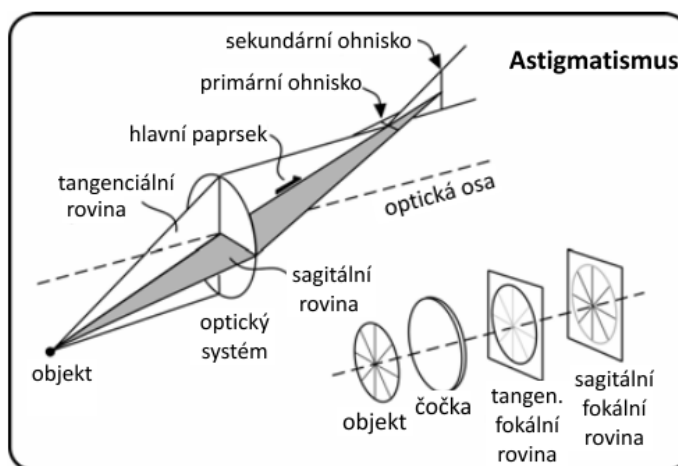
$$PWR = C_3R^2 \quad (3.7)$$

Kde C_x jsou odvozeny fitem povrchu a R je poloměr nebo vzdálenost mezi středem a nejdál od středu. [47]



Obrázek 23: Ilustrace PWR
převzato a upraveno z [47]

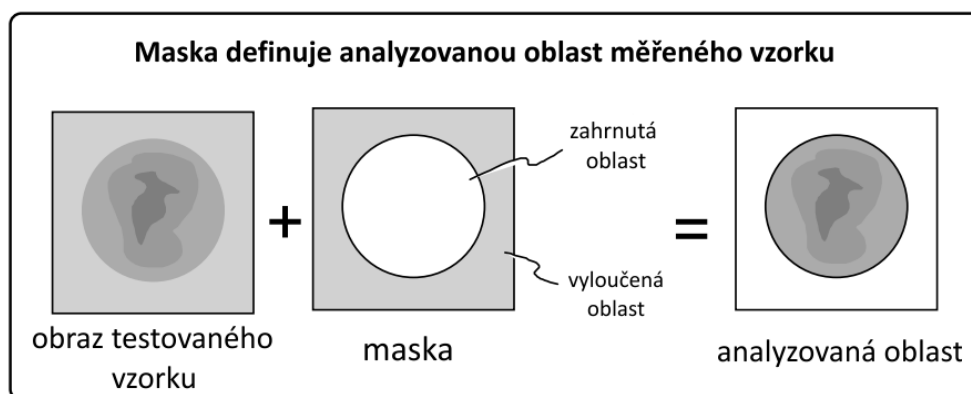
- **AST** – aberace vlnplochy, při které paprsky v kolmých rovinách (tangenciální rovina a sagitální rovina) nejsou fokusovány do bodového ohnisko. Paprsky se protnou s hlavním paprskem ve dvou různých bodech, v primárním, respektive sekundárním ohnisku. Astigmatismus je způsoben nepravidelným zakřivením optických povrchů. [47, 49]



Obrázek 24: Ilustrace AST
převzato a upraveno z [47]

Maska:

Maska slouží k vymezení měřené oblasti z celkové oblasti interferenčního obrazu viz Obrázek 25. Pro měření laserových tyčí se používá kruhová referenční a měřicí maska. Měřicí maska se umístí na testovanou oblast (čelo laserové tyče). Vybraná oblast je porovnávána s referenční oblastí, která je definována referenční maskou. Referenční maska slouží k výběru standardu, vůči kterému bude testovaná oblast porovnávána. Pro měření deformace vlnoplochy laserových tyčí se referenční maska umístí mimo oblast laserové tyče, prizma, ve kterém je tyč umístěna a mimo jejich interferenční jevy, tak aby vyznačovala oblast, ve které nedochází k deformaci vlnoplochy viz Obrázek 34. [47]



Obrázek 25: Ilustrace použití masky
převzato a upraveno z [47]

Deformace vlnoplochy – Peak-to-valley:

Peak-to-valley (PV) udává vzdálenost mezi nejnižším a nejvyšším bodem na zkoumané ploše (vlnoploše). Jelikož PV porovnává dva extrémy (Obrázek 26), představuje nejvyšší možnou chybu. Tato hodnota je důležitá, jelikož i prostorově nevýrazná porucha materiálu, avšak s vysokou hodnotou PV, může způsobit nehomogenní distribuci laserového záření v materiálu – jeho bodovou fokusaci, která způsobí lokální zvýšení teploty, což může vést až k destrukci materiálu. [7, 47]



Obrázek 26: Ilustrace chyby peak-to-valley
převzato a upraveno z [47]

Pro vhodné laserové tyče s menším průměrem cca 3–4 mm se hodnota PV pohybuje typicky v rozmezí $0-0,15 \lambda$, u tyčí s větším průměrem (> 4 mm) hodnota PV může dosahovat cca $0,20-0,40 \lambda$.

Zaručení malé deformace vlnoplochy je velice důležité, a to hlavně pro aplikace laseru, při kterých velmi záleží na tvaru výstupní vlnoplochy, např. medicínské aplikace.

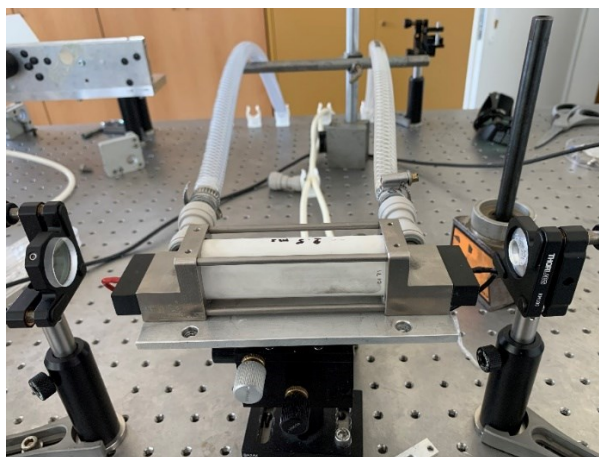
3.5 Výstupní energie laserové svazku

Hlavním účelem toho měření je stanovení výstupní energie laserové svazku E_{out} v režimu volné generace.

Pro provedení měření je tyč umístěná do laserového rezonátoru (Obrázek 27), který se skládá z:

- Vysoce odrazivého (HR) zrcadla
- Výstupního polopropustného (OC) zrcadla
- Čerpací komory

Čerpací komora slouží k vytvoření inverzní populace v aktivním mediu, které je do komory umístěno. V komoře se nachází zdroj čerpání, který zajistí excitaci aktivního media. Pro čerpání Nd: YAG laserových tyčí se používá xenonová výbojka. Pro dosažení efektivního čerpání je výbojka a laserová tyč umístěna do ohnisek eliptického reflektoru vyrobeného z difuzní keramiky Al_2O_3 .



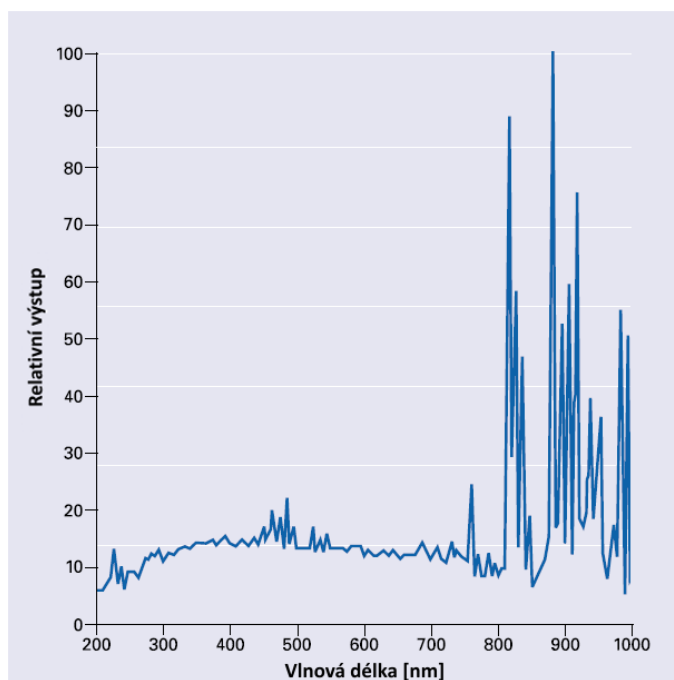
Obrázek 27: Laserový rezonátor pro měření výstupní energie laserového svazku

Xenonová výbojka je řízená napájením založeným na LC obvodu ovládaným vstupním napětím na kondenzátoru. Energie E_{in} výbojky lze vypočítat pomocí vzorce (3.8).

$$E_{in} = \frac{CU^2}{2} \quad (3.8)$$

Kde C je kapacita kondenzátoru a U je vstupní napětí na kondenzátoru.

Výbojka září v celém spektru od UV záření po IR záření (Graf 1). Absorpční pík Nd: YAG krystalu je 808 nm, který koreluje s jedním výraznějším píkem spektra xenonové výbojky.



Graf 1: Vyzařovací spektrum xenonové výbojky
převzato a upraveno z [50]

4 Experimentální část

Experimentální část této diplomové práce se zaměřuje na inovaci a aplikaci metod optické kontroly kvality laserových tyčí. V této kapitole je popsána inovace metody vizualizace mechanického pnutí a měření extinkčního poměru společně s popisem jejich aplikace na sledovaný soubor vzorků. Dále jsou popsány postupy měření deformace vlnoplochy a měření energie výstupního laserového svazku.

4.1 Vzorky

Pro určení závislosti mezi defekty Nd: YAG a jejich studovanými parametry byly vybrány následující skupiny laserových tyčí

Tabulka 3: Skupiny vzorků laserových tyčí

<i>Rozměr</i>	<i>Opracování pláště</i>	<i>Koncentrace Nd³⁺ [%]</i>	<i>Počet kusů</i>
<i>3 x 50 mm</i>	Broušený	1	13
<i>3 x 53 mm</i>	Broušený	0,8	3
<i>4,5 x 49 mm</i>	Leštěný/ broušený	0,65	17
<i>6 x 116 mm</i>	Broušený	1,1	10
<i>3 x 25,1 mm</i>	Částečně broušený	0,7	3
<i>4 x 25,1 mm</i>	Částečně broušený	0,7	3

Některé laserové tyče rozměru 3 x 50 mm, 3 x 53 mm měly na svých čelech napařené antireflexní vrstvy (AR) pro vlnovou délku 1064 nm. Laserové tyče s těmito vrstvami jsou označeny AR/AR v tabulkách v kapitole 5.

Laserové tyče s rozměry 3 x 50 mm, 3 x 53 mm a 6 x 116 mm měly obě čela leštěna paralelně, kolmo k ose tyče. Laserové tyče s rozměrem 4,5 x 49 mm měly obě čela leštěna paralelně pod úhlem 15° vzhledem k ose tyče. Laserové tyče 4,5 x 49 mm

č. 8A200–8A203 měly broušený plášť a jejich čela byla leštěna paralelně, kolmo k ose tyče.

Ke zkoumaným vzorkům byla zařazena také menší skupina laserových tyčí s částečně broušeným pláštěm s rozměry 3 x 25,1 mm a 4 x 25,1 mm. Čela těchto tyčí byla leštěna paralelně pod úhlem 1° vzhledem k ose tyče.

4.2 Metoda počítačové vizualizace mechanického pnutí v laserových tyčích

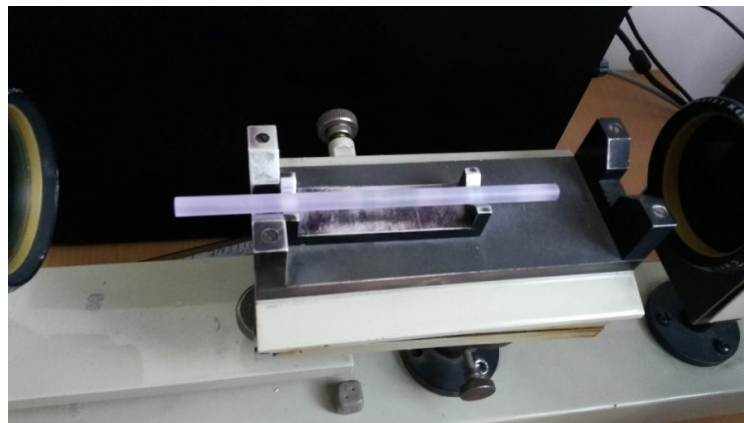
Kontrola mechanického pnutí v laserových tyčích patří mezi vizuální metody a běžně se provádí po vyvrtání tyčí z krystalu, před jejich opracováním.

Použité přístroje:

- Meopta polariskop
- Kamera Levenhuk M500 BASE

4.2.1 Původní postup pozorování mechanického pnutí

Laserová tyč se umístí do prizmatu mezi zkřížené polarizátory (Obrázek 28), tak aby její osa ležela v ose polariskopu (Obrázek 17). Poté se laserová tyč prosvítí lampou, která vyzařuje bílé světlo. Obraz laserové tyče je pozorován zvětšovací optikou (okulárem). Na obrazu laserové tyče lze pozorovat interferenční barvy (Obrázek 32), které vznikají v důsledku průchodu bílého světla dvojlomným materiálem umístěným mezi zkříženými polarizátory.



Obrázek 28: Laserová tyč umístěná v prizmatu mezi zkříženými polarizátory

Jelikož však v tomto uspořádání metody nebylo možné obrazy tyčí pořizovat ani nikterak uchovávat, byla navržena metoda digitalizace výstupu pomocí kamery pro mikroskopy.

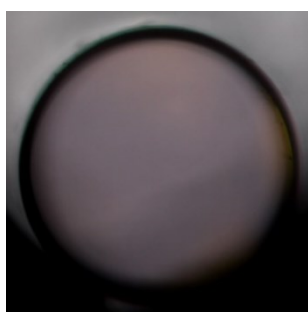
4.2.2 Počítačová vizualizace mechanického pnutí

Aby bylo možné obrazy laserových tyčí převést do digitální podoby, okulár, který se doposud používal k pozorování, byl vyměněn za kameru Levenhuk M500 BASE (viz Obrázek 29). Kamera byla pomocí USB kabelu připojena k stolnímu počítači a obrazy byly pořizovány pomocí programu LevenhukLite.

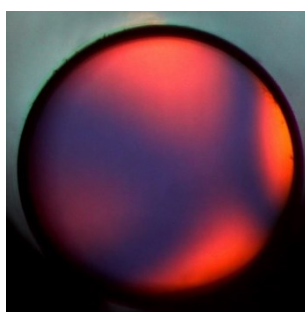
Ačkoliv byl obraz digitalizován, věrnost podání barev (Obrázek 30) byla natolik nedostatečná, že ani obraz, podrobený softwarovým úpravám, nebyl vyhovující. Z tohoto důvodu byl do přístroje mezi zkřížené polarizátory umístěn filtr infračerveného záření, který zajistil filtraci rušivé složky záření (Obrázek 31). Následně bylo zapotřebí softwarově nastavit vyvážení bílé, jas, kontrast, sytost, odstín a hodnotu gamma (Obrázek 32).



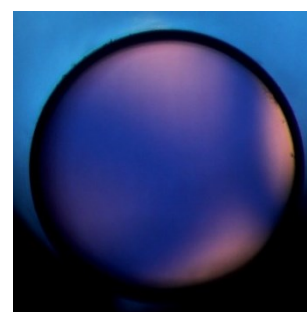
Obrázek 29: Kamera Levenhuk umístěná v tubusu polariskopu na místo okuláru



Obrázek 30: Obraz bez úprav



Obrázek 31: Obraz s použitím filtru IČ



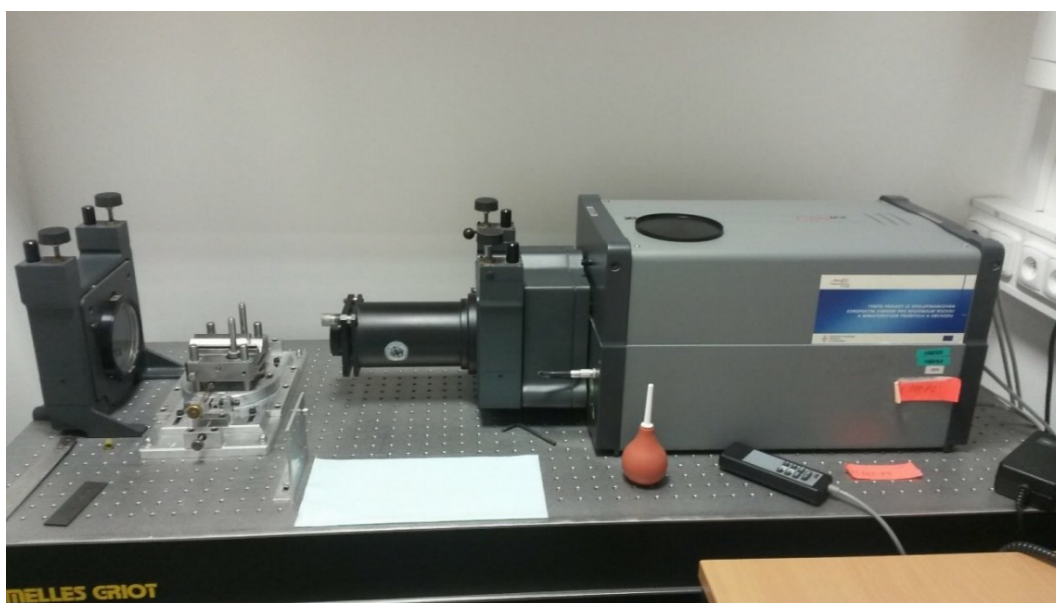
Obrázek 32: Obraz s použitím filtru IČ a úprav pomocí softwaru

4.3 Měření deformace vlnoplochy

Deformace vlnoplochy laserových tyčí byla měřena pomocí Fizeau interferometru (s dvojitým průchodem) od společnosti Zygo. Deformace vlnoplochy byla měřena v násobcích vlnové délky λ He-Ne laseru, $\lambda = 632,8$ nm. Sledována byla hodnota PV. Pro měření byl použit Normální mód (viz kapitola 3.4.4) s odečtením TLT a PST.

Použitý přístroj:

- Zygo interferometr GPITM XP/D



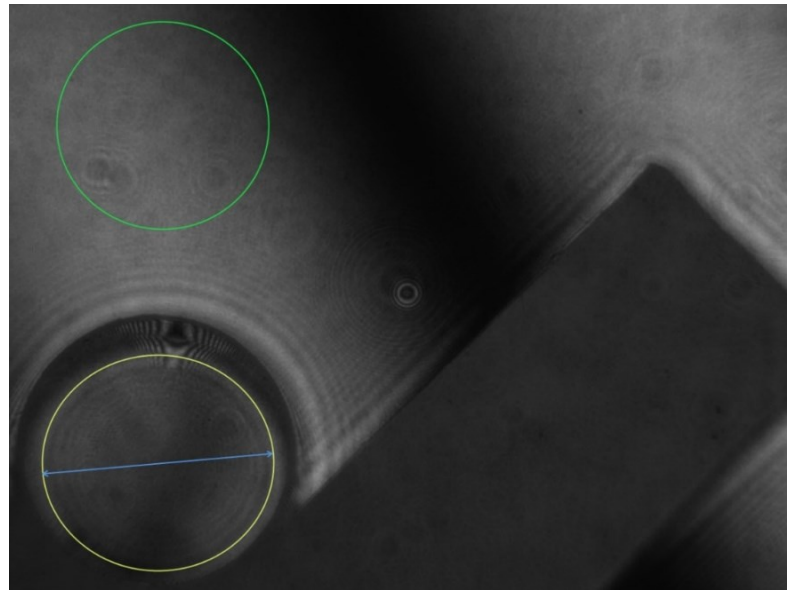
Obrázek 33: Zygo interferometr

4.3.1 Postup měření deformace vlnoplochy

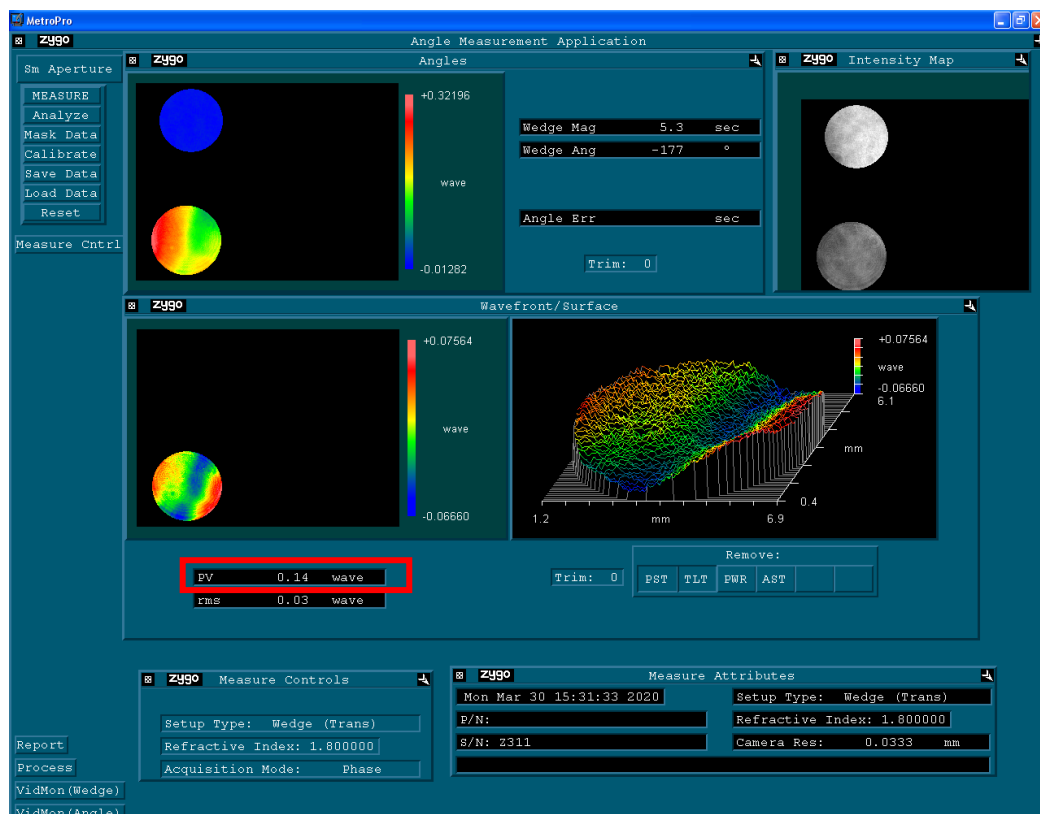
Zygo interferometr (Obrázek 33) měří pomocí programu MetroPro®. Po zapnutí programu se zobrazí v jednom okně měřicí rozhraní (Obrázek 35) a v druhém okně se zobrazí interferenční obraz (Obrázek 34).

Laserová tyč je umístěna do prizmatu a pomocí justačních šroubů je její poloha nastavena tak, aby jí procházel laserový svazek. Poloha laserové tyče je kontrolována pomocí interferenčního obrazu (Obrázek 34). Typicky je laserová tyč nastavena tak, aby se nacházela mimo střed obrazu (mimo osu laserového svazku), kde vzniká nežádoucí interference svazku se sebou samým. Ovládáním zvětšovací optiky interferometru je obraz tyče přibližován nebo oddalován, tak aby měl vhodnou velikost. Vhodnou

velikostí je myšleno, aby byl obraz tyče dostatečně velký, ale zároveň nezasahoval do středu obrazu, kde se vyskytují parazitní interference.



Obrázek 34: Interferenční obraz – maska tyče (žlutá), referenční maska (zelená), průřez tyče (modrá)



Obrázek 35: Rozhraní programu MetroPro® – příklad interferogramu (průměr tyče 6 mm, deformace vlnoplochy 0,14 λ , kde $\lambda = 632,8 \text{ nm}$)

Po správném umístění tyče, je v programu MetroPro® pomocí tlačítka **Mask data** na interferenčním obraze nastavena měřicí maska, kterou je označeno čelo tyče a referenční maska, která je umístěna do oblasti mimo tyč. Pomocí funkce **Calibrate** je definována velikost průřezu tyče (Obrázek 34). Tlačítkem **Measure ctrl** se otevře nabídka nastavení, kam se zapíše číslo laserové tyče.

Po provedení všech nastavení je interferogram změřen stisknutím tlačítka **MEASURE** (Obrázek 35).

4.4 Automatizace měření extinkčního poměru

Pro určité aplikace (viz kapitola 3.3) je zásadní znát stupeň depolarizace, kterou laserová tyč způsobuje. Doposud se používala jednoduchá optická sestava, pomocí které však nebylo možné dostatečně přesně měřit extinkční poměr tyčí s větším průměrem než 4 mm.

Poruchy laserové tyče, které způsobují depolarizaci záření, mohou být pouze bodové. Pomocí doposud používané optické sestavy bylo obtížné tyto poruchy odhalit, a proto se zrodila myšlenka automatizace a přestavby měření, díky které by bylo možno provádět měření přesněji.

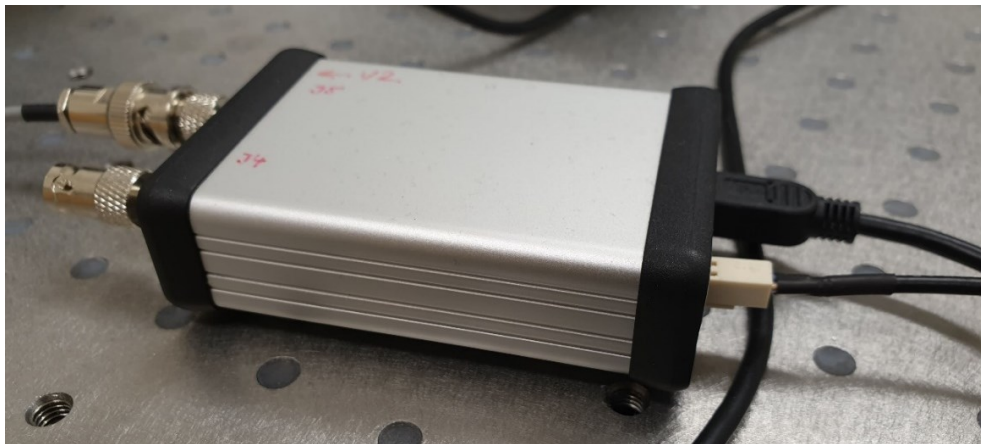
Optické komponenty a přístroje:

- He-Ne laser LASOS LGK 7628
- Expandér laserového svazku Edmund optics TECHSPEC® Broadband VIS 2X – 8X
- Optický shutter z tekutých krystalů Thorlabs LCC1620
- Čtvrt-vlnová destička Thorlabs WPQ05M-633
- Irisová clona Thorlabs SM1D12C
- 2× krokový rotační motor Thorlabs K10CR1
- 2× polarizátor
- Tubus na čočku Thorlabs SM1L35
- Neutrální filtr – referenční útlum 30,6 dB
- FFT měřicí systém (MFFT)

4.4.1 Princip měření extinkčního poměru

Při měření extinkčního poměru je měřen výkon monochromatického záření, po průchodu laserovou tyčí, která je umístěna mezi dvěma polarizátory. Nejprve je změřen výkon záření, které je transmitováno laserovou tyčí mezi paralelními polarizátory, poté je jeden polarizátor otočen o 90° (tzn. polarizátory jsou zkřížené) a je změřen výkon transmitovaného záření i pro tuto konfiguraci.

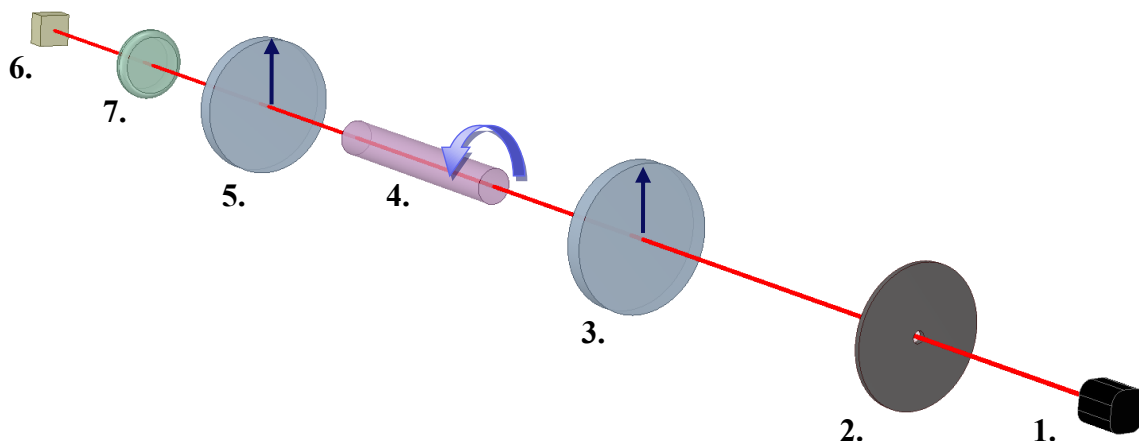
Aby bylo možno měření automatizovat a naměřená data převést do počítače a zpracovat, byl použit měřicí systém s rychlou Fourierovou transformací (FFT) (Obrázek 36). Měřicí systém (MFFT) amplitudově moduluje záření o frekvenci ν_m . Po průchodu optickou sestavou modulované záření dopadne na fotodiodu, která je připojena k měřicímu systému. Elektrický proud, který je generován fotodiodou je v MFFT zpracován pomocí FFT, čímž je pro frekvenci ν_m vypočtena maximální amplituda. MFFT je připojen k počítači, který slouží k zobrazení výstupních naměřených hodnot.



Obrázek 36: Zapouzdřený měřicí systém (MFFT)

4.4.2 Měřicí sestava pro měření extinkčního poměru

Původní sestava měření byla nedokonalá. Zdrojem záření byla laserová dioda, která vykazovala krátkou životnost a nízký stupeň polarizace. Polarizátory byly statické a otáčelo se laserovou tyčí (Obrázek 37). Otáčení laserové tyče nebylo dostatečně jemné a laserový svazek procházel jen středem apertury laserové tyče, proto došlo k vytvoření jiného přístupu. V případě paralelních polarizátorů, byl za druhý polarizátor umístěn filtr, který sloužil ke snížení intenzity světla. Pro zkřížené polarizátory byl filtr odebrán.

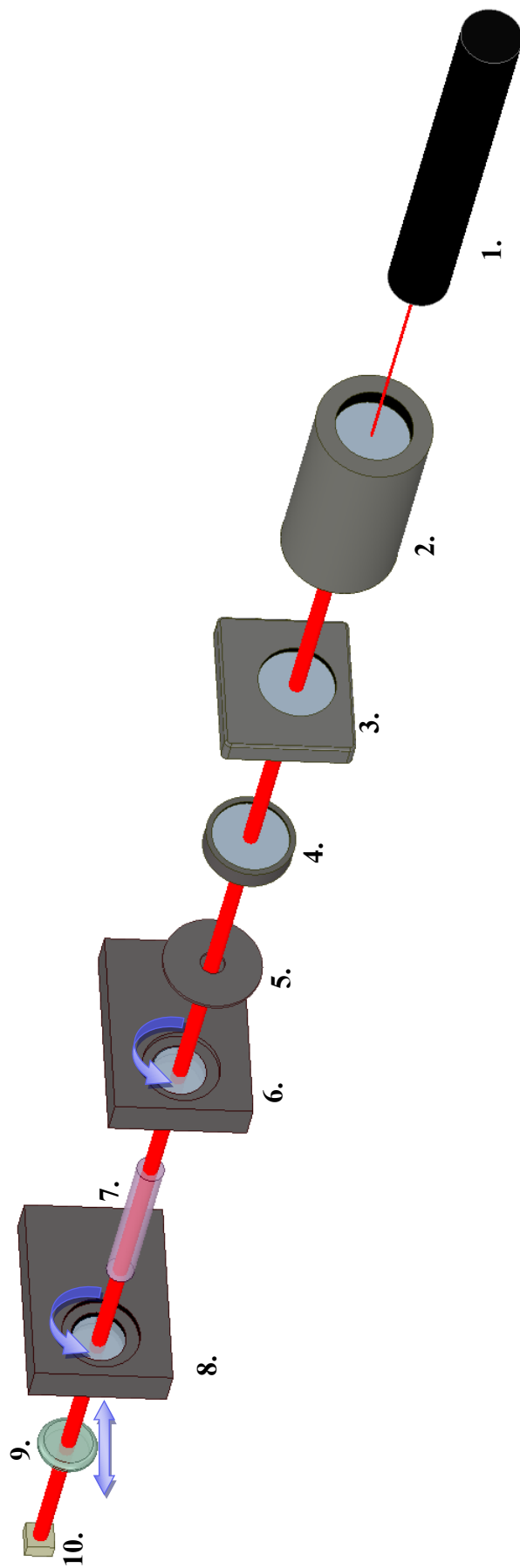


Obrázek 37: Schéma původní sestavy měření extinkčního poměru při paralelních polarizátorech:
 1. laserová dioda, 2. irisová clona, 3. polarizátor, 4. laserová tyč, 5. polarizátor, 6. fotodioda, 7. filtr

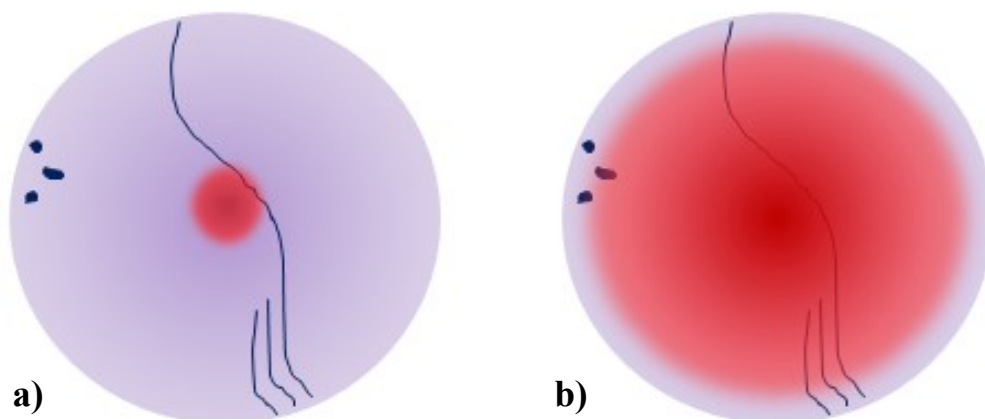
V novém uspořádání (Obrázek 38) byly polarizátory umístěny do rotačních motorů, laserová tyč zůstala statická a používání filtru zůstalo neměnné. V tomto případě však na první polarizátor musí dopadat kruhově polarizované světlo, aby v každé poloze jeho natočení byla intenzita, která projde polarizátorem, stejná. Místo laserové diody byl použit lineárně polarizovaný He-Ne laser, který má vyšší stupeň polarizace. Kruhově polarizované světlo bylo vytvořeno pomocí čtvrt-vlnové destičky, která byla umístěná do dráhy laserového svazku.

Po výměně laserové diody za He-Ne laser, musela být vyřešena otázka modulace laserového svazku. Jelikož He-Ne laser nebylo možno modulovat stejným způsobem jako laserovou diodu, byl k tomuto účelu použit externí elektro-optický prvek – shutter z tekutých krystalů. Shutter, který byl připojen k MFFT zajistil modulaci míry propustnosti tekutých krystalů. Takto byla zajištěna amplitudová modulace laserového záření He-Ne laseru frekvencí $\nu_m = 90$ Hz.

Aby se docílilo vyšší přesnosti měření, průměr laserového svazku byl pomocí expandéru roztažen tak, aby záření procházelo cca 80 % plochy apertury laserové tyče, nikoliv pouze jejím středem. Roztažení svazku mělo zajistit zachycení i těch nehomogenit materiálu, které neroztažený svazek s menším průměrem nemohl zachytit (Obrázek 39).



Obrázek 38: Schéma nové měřicí sestavy extinkčního poměru: 1. He-Ne laser, 2. expandér laserového svazku; 3. shutter, 4. čtvrt-vlnová destička, 5. irisová clona, 6. polarizátor umístěný v rotačním motoru, 7. laserová tyč, 8. polarizátor umístěný v rotačním motoru, 9. filtr, 10. fotodioda



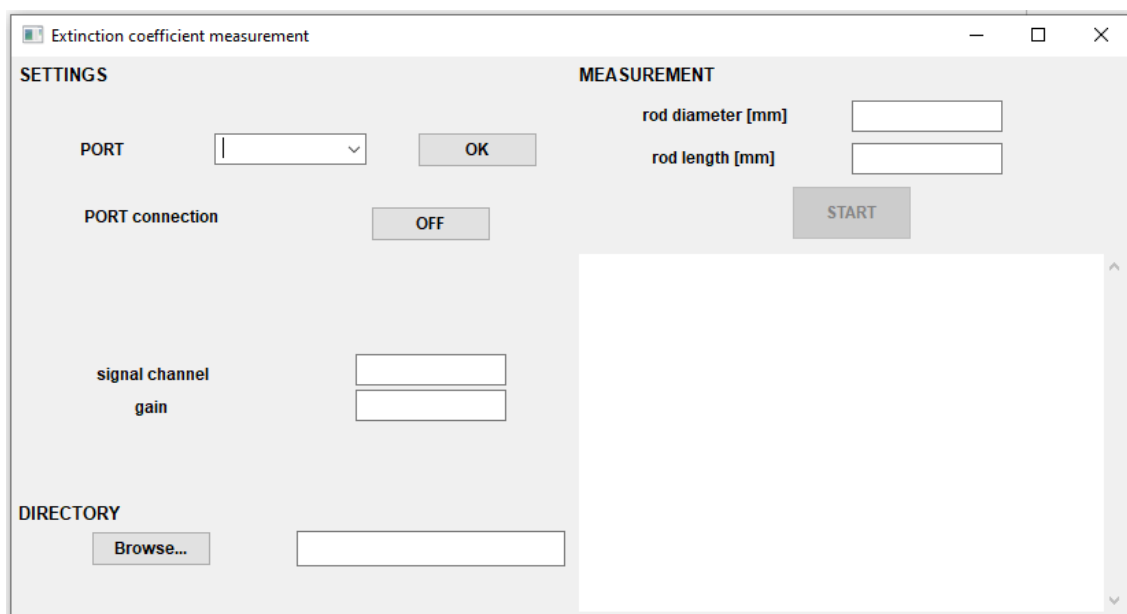
Obrázek 39: Znárodnění nehomogenit laserové tyče, kterými laserový svazek prochází:
a) původní svazek b) roztažený svazek

4.4.3 Popis skriptu pro automatizované měření extinkčního poměru

Pro potřeby načítání dat z MFFT, zpracování naměřených dat a řízení rotačních motorů byl vytvořen skript, ovládaný přes grafické uživatelské rozhraní (GUI), ve skriptovacím programovacím jazyce Python 3.

V následujícím textu budou uvedeny pouze ukázky důležitých částí kódu.

GUI (Obrázek 40) bylo vytvořeno pomocí modulu wxPython.



Obrázek 40: Grafické uživatelské rozhraní pro měření extinkčního poměru

Postup použití GUI:

- Uživatel si v nabídce **PORT** vybere síťový port, kterým je měřicí systém (MFFT) připojen k počítači a svůj výběr potvrdí stisknutím tlačítka **OK**.
- Po stisknutí tlačítka **OFF/ON** je síťový port připojen a data z měřicího systému se začnou načítat.
- V políčku **signal channel** je zobrazována aktuální naměřená hodnota amplitudy záření.
- Pomocí tlačítka **Browse...** je vybrán adresář, do kterého se budou ukládat naměřená data.
- Políčka **rod diameter** a **rod length** slouží k vyplnění průměru laserové tyče a její délky.
- Měření je spuštěno tlačítkem **START**.
- V okně pro záznam dat je zobrazován aktuální postup měření a následně změřené hodnoty extinkčního poměru.

Data ze síťového portu jsou vyčítána pomocí funkcí modulu `pyserial`.

Po stisknutí tlačítka **START** jsou načteny informace o rotačních motorech (Zdrojový kód 1), které jsou ovládány pomocí funkcí modulu `msl.equipment`. V rotačních motorech jsou umístěny polarizátory.

```
record_1 = EquipmentRecord(  
    manufacturer='Thorlabs', # výrobce  
    model='K10CR1/M', # číslo modelu  
    serial='55000525', # sériové číslo  
    connection=ConnectionRecord(  
        backend=Backend.MSL,  
  
    address='SDK::Thorlabs.MotionControl.IntegratedStepperMotors.dll',  
    ),  
)  
motor_1 = record_1.connect() # připojení 1. motoru
```

Zdrojový kód 1: Informace o rotačním motoru a jeho připojení

Motory jsou nastaveny do nulové pozice, ve které jsou polarizátory orientovány paralelně. Aby bylo zajištěno, že oba motory budou v nulové pozici před započítím další sekvence měření, byla vytvořena funkce `wait` (Zdrojový kód 2), která zajistí pokračování až v momentě, kdy se motory nacházejí v požadovaných pozicích.


```

def wait(value_1, value_2):
# value_1, value_2 = messageID

    motor_1.clear_message_queue()
    motor_2.clear_message_queue()

# Message queue má tři komponenty:
# messageType: {2: 'GenericMotor'}
# messageID: {0: 'Homed', 1: 'Moved', 2: 'Stopped', 3: 'LimitUpdated'}
# messageData: _

    message_type_1, message_id_1, _ = motor_1.wait_for_message()
    message_type_2, message_id_2, _ = motor_2.wait_for_message()
    while message_id_1 != value_1 or message_type_1 != 2:
        message_type_1, message_id_1, _ = motor_1.wait_for_message()

    while message_id_2 != value_2 or message_type_2 != 2:
        message_type_2, message_id_2, _ = \
            motor_2.wait_for_message()

```

Zdrojový kód 2: Funkce wait – zajistí vzájemné čekání motorů

Polarizátory jsou poté synchronně krokově otočeny z 0° na 180° s krokem 10° (Zdrojový kód 3). Jednotky, se kterými motory pracují, jsou mikro-kroky (micro-steps [μstep]). Pro výpočet správné pozice, rychlosti a zrychlení je využito následující přepočtové tabulky.

Tabulka 4: Přepočtová tabulka jednotek pro rotační motory [51]

<i>Model</i>	<i>Pozice</i>	<i>Převodní jednotky (micro-steps [μstep])</i>		
		Pozice [μstep]	Rychlost [μstep/s]	Zrychlení [μstep/s ²]
K10CR1	1°	136533	7329109	1502

V každé poloze je načtena změřená hodnota z MFFT. Vzhledem k provedeným testovacím měřením s různým krokem, byl krok 10° vyhodnocen jako optimální vzhledem k přesnosti a rychlosti provedeného měření.

Následně je první polarizátor (č. 6. na Obrázku 38) nastaven do nulové polohy a druhý polarizátor je vůči němu natočen o 90°, polarizátory jsou takto ve zkřížené konfiguraci. Z dráhy laserového svazku je odstraněn filtr (č. 9. na Obrázku 38) a polarizátory jsou opět synchronně otočeny o 180° s krokem 10°.

```

steps = 19      # počet provedených kroků
s = 136533     # přepočtová jednotka μstep

for step in range(0, steps):
# definice absolutní polohy, na kterou se m1 a m2 v danem kroku posune
    abs_position = (step * 10) * s

# nastavení absolutní polohy
    motor_1.set_move_absolute_position(abs_position)
    motor_2.set_move_absolute_position(abs_position)

# posunutí na absolutní polohu
    motor_1.move_absolute()
    motor_2.move_absolute()

    wait(1, 1) # funkce wait (viz výše)

```

Zdrojový kód 3: Příklad For cyklu pro synchronní krokový pohyb

Pro každou polohu je vypočten extinkční poměr podle vzorce (4.1) a je vybrána nejnižší hodnota, která charakterizuje největší depolarizaci materiálu. Hodnota 1150 koriguje útlum filtru použitého v optické sestavě při paralelních polarizátorech, odpovídá útlumu záření o 30,6 dB.

$$PER = 10 \log_{10} \frac{1150 \cdot I_{\parallel}}{I_{\perp}} [dB] \quad (4.1)$$

Vypočtený extinkční poměr společně s informacemi charakterizujícími laserovou tyč je uložen do csv souboru. Pomocí modulu Pandas jsou data ze souboru csv přepsána také do souboru xlsx (Zdrojový kód 4).

```

# EXPORT DAT - tabulka výsledných hodnot (soubor csv)
# save_path - cesta k adresáři, který byl vybrán tlačítkem Browse...
path_results_csv = (save_path + '\EXT_results.csv')

# otevření souboru (pokud soubor neexistuje, vytvoří se nový)
with open(path_results_csv, mode="a") as ext_file:
    # hlavička
    header = ["Rod number", "Rod diameter", "Rod length", "Min EXT", "Date"]

    # definice způsobu zápisu
    ext_writer = csv.DictWriter(ext_file, fieldnames=header, delimiter=",")

    # ověření, zda je soubor prázdný (byl teprve vytvořen) nebo zda obsahuje
    # nějaká data
    file_name = path_results_csv
    file_empty = os.stat(file_name).st_size == 0

    # pokud je soubor prázdný, jako první řádek se vypíše hlavička
    if file_empty:
        ext_writer.writeheader()

    # Zápis nového řádku s naměřenými daty
    # "Rod number" - výběr sloupce zápisu, rod_number - hodnota, která se do
    # sloupce zapíše
    ext_writer.writerow({"Rod number": rod_number, "Rod diameter": \
        rod_diameter, "Rod length": rod_length, "Min EXT": ext_min, "Date":\
        date_today})

# Export dat do xlsx
import pandas as pd

# vyčtení dat ze souboru csv
df = pd.read_csv(path_results_csv)

# cesta k adresáři pro uložení
path_results_xl = (save_path + '\EXT_results.xlsx')

# definice způsobu zápisu
writer = pd.ExcelWriter(path_results_xl, engine='xlsxwriter')

# zápis dat do souboru xlsx (excelu)
df.to_excel(writer, index=False, sheet_name='Sheet1')

# vytvoření listu v excelu
worksheet = writer.sheets["Sheet1"]

```

Zdrojový kód 4: Zápis dat do souboru csv a xlsx

4.4.4 Nejistota měření extinkčního poměru

Nejistota měření byla určena z deseti opakování měření extinkčního poměru jedné laserové tyče. Vypočtená směrodatná odchylka měla hodnotu 0,9 dB.

4.5 Měření výstupní energie a profilu laserového svazku

Toto měření bylo provedeno laserovou laboratoří Crytur spol. s r. o.

Během měření byla měněna čerpací energie výbojky E_{in} a zároveň byla měřena výstupní energie E_{out} laserového svazku v režimu volné generace. Také byl zachycen profil výstupního svazku.

4.5.1 Optická sestava měření a použité přístroje

Laserové tyče 4,5 x 49 mm:

- Délka rezonátoru: 16 mm
- HR zrcadlo: $r = -10000$ mm
- OC zrcadlo: planární, $R = 50\%$ @ 1064 nm
- Typ reflektoru: eliptická difuzní keramika Al_2O_3
- Čerpání: xenonová výbojka
- Chlazení vzduchem
- Energetická měrka: Ophir Nova s pyroelektrickou hlavou PE50-DIF
- Vyhodnocení profilu svazku: Duma SpotOn CCD kamera
- He-Ne laser pro seřízení rezonátoru do optické osy

Laserové tyče 6 x 116 mm:

- Délka rezonátoru: 240 mm
- HR zrcadlo: $r = -1200$ mm
- OC zrcadlo: planární, $R = 50\%$ @ 1064 nm
- Čerpání: xenonová výbojka
- Vodní průtokové chlazení
- Energetická měrka: Ophir Nova s termálním senzorem L40
- He-Ne laser pro seřízení rezonátoru do optické osy

4.5.2 Postup měření výstupní energie a profilu laserového svazku

Nejprve byly všechny optické elementy laserového rezonátoru – OC zrcadlo, laserová tyč a HR zrcadlo – seřizeny do optické osy definované svazkem He-Ne laseru. Všechny elementy byly nastaveny pomocí autokolimace. Při autokolimaci odraz od studovaného povrchu dopadá zpět přesně do středu zdroje záření. Po seřízení laserového rezonátoru byl He-Ne laser odstraněn a laserová tyč byla připravena pro čerpání. Po zahájení čerpání byl systém podroben dodatečnému jemnému seřízení HR zrcadla. Finální kontrola seřízení byla provedena zachycením profilu výstupního svazku pomocí CCD kamery (pro tyče rozměru 4,5 x 49 mm) při nízké čerpací energii (v tomto případě 3,8 J). Pro laserové tyče o rozměru 6 x 116 mm byl profil výstupního svazku zachycen na fotocitlivý papír při čerpací energii $E_{in} = 700$ J. Profil výstupního svazku by se měl v ideálním případě co nejvíce podobat kruhu.

Vybrané laserové tyče byly postupně umístěny do čerpací komory, kde byly čerpány xenonovou výbojkou. Energie čerpání E_{in} byla během měření zvyšována a zároveň byla pro jednotlivé hodnoty E_{in} měřena odpovídající výstupní energie laserového svazku E_{out} .

Nastavení modu měření pro laserové tyče 4,5 x 49 mm:

- Frekvence opakování pulsu: $f_p = 0,3$ Hz
- Počet měřených pulsů: $n_p = 50$
- Výstupní energie: E_{out} = průměrná energie ze série n_p pulsů
- Profil svazku pořízen pro $E_{in} = 3,8$ J; $f_p = 0,3$ Hz

Nastavení modu měření pro laserové tyče 6 x 116 mm:

- Frekvence opakování pulsu: $f_p = 1$ Hz
- Počet měřených pulsů: $n_p = 50$
- Výstupní energie: E_{out} = průměrná energie ze série n_p pulsů
- Profil svazku pořízen pro $E_{in} = 700$ J; $f_p = 0,3$ Hz

5 Výsledky

Laserové tyče byly rozděleny do dvou hlavních kategorií vzhledem k původu poruch, které byly pozorovány metodou vizualizace mezi zkříženými polarizátory. V laserových tyčích byly pozorovány poruchy, které vznikají v monokrystalu při pěstování – materiálové poruchy a poruchy, které vznikají při opracování.

Materiálové poruchy

1. Praskliny
2. Nehomogenity indexu lomu

Poruchy indukované opracováním

1. Indukované mechanické pnutí
 - Broušením pláště
 - Leštěním pláště
 - Částečným broušením pláště
2. Okrajové defekty

5.1 Limity sledovaných parametrů

V Tabulce 5 jsou uvedeny typické hodnoty deformace vlnoplochy (WFD) a extinkčního poměru (PER). WFD je udávána v násobcích vlnové délky He-Ne laseru použitého pro měření v interferometru, $\lambda = 632,8$ nm. V závislosti na optické kvalitě jsou laserové tyče rozděleny do tří kategorií kvality – výborná (splňuje nejpřísnější specifikace), průměrná a špatná (nevyhovuje specifikacím). Samozřejmě vždy záleží na konkrétní aplikaci laserové tyče, proto byla Tabulka 5 sestavena podle hodnot, které jsou typické pro výrobu laserových tyčí v Crytur spol. s r. o.

Tabulka 5: Hodnocení velikosti deformace vlnoplochy (WFD) a extinkčního poměru (PER) vzhledem k rozměru laserové tyče

	<i>Laserové tyče ø 3 mm</i>			<i>Laserové tyče ø 4,5 a 6 mm</i>		
<i>Slovní hodnocení</i>	Výborná	Průměrná	Špatná	Výborná	Průměrná	Špatná
<i>WFD</i>	< 0,1 λ	0,1–0,15 λ	> 0,15 λ	< 0,2 λ	0,2–0,4 λ	> 0,4 λ
<i>PER [dB]</i>	> 35	35–28	< 28	> 35	35–28	< 28

Pozn.: $\lambda = 632,8$ nm

5.2 Laserové tyče bez poruchy

Tabulka 6: Naměřená data pro laserové tyče bez poruchy

Číslo tyče	Průměr [mm]	Délka [mm]	WFD	PER [dB]	Vrstva
<i>R465</i>	3,0	50,0	0,11 λ	47,7	AR/AR
<i>V018</i>	3,0	50,0	0,10 λ	47,1	AR/AR
<i>2A405</i>	3,0	53,0	0,11 λ	46,8	AR/AR
<i>V017</i>	3,0	50,0	0,10 λ	46,7	AR/AR
<i>R474</i>	3,0	50,0	0,11 λ	46,6	AR/AR
<i>V019</i>	3,0	50,0	0,11 λ	46,2	AR/AR
<i>3A206</i>	6,0	116,0	0,10 λ	45,4	-

Pozn.: $\lambda = 632,8 \text{ nm}$; nejistoty – rozměr: $+0/-0,05 \text{ mm}$; $WFD = \pm 0,01 \lambda$; $PER = \pm 0,9 \text{ dB}$
AR/AR – antireflexní vrstva na obou čelech laserové tyče pro vlnovou délku 1064 nm



Obrázek 41: Příklad laserové tyče bez poruchy umístěné mezi zkříženými polarizátory

Mezi všemi měřenými vzorky byly také laserové tyče, které při pozorování pomocí vizualizace mechanického pnutí mezi zkříženými polarizátory nevykazovaly vznik interferenčních barev (Obrázek 41). Všechny tyto tyče měly hodnotu PER větší než 45 dB a hodnotu WFD menší než 0,11 λ .

5.3 Materiálové poruchy laserové tyče

Tento typ poruch vzniká při samotném pěstování laserového monokrystalu.

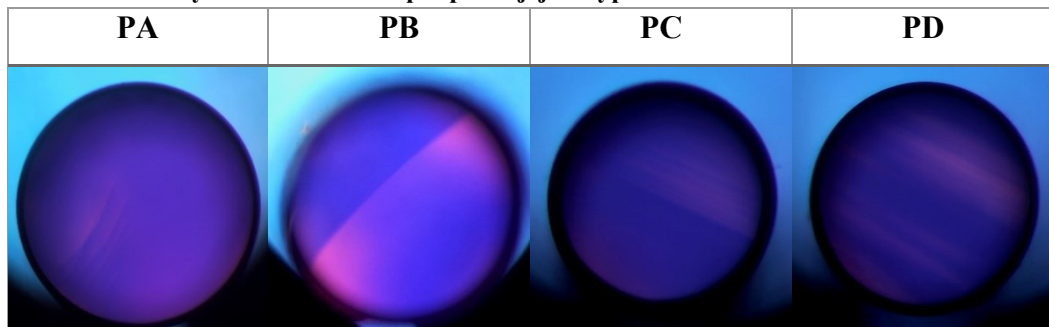
5.3.1 Praskliny

Typy prasklin byly rozřazeny do čtyř kategorií vzhledem k obrazu laserové tyče pořízeného pomocí vizualizace mezi zkříženými polarizátory (viz Tabulka 7).

Typy prasklin:

- PA – krátké méně výrazné praskliny, které se nalézají jen v lokalizované části apertury.
- PB – jedna velká výrazná prasklina (lze pozorovat výrazný přechod mezi interferenčními barvami).
- PC – větší množství méně výrazných prasklin, které se nacházejí jen na části apertury.
- PD – větší množství méně výrazných prasklin, které se nacházejí v celé oblasti apertury

Tabulka 7: Praskliny rozřazené do skupin podle jejich typu



Laserové tyče s prasklinami byly rozřazené do kategorií podle Tabulky 7 a všechny jejich parametry – číslo tyče, rozměr, WFD, PER, typ poruchy, byly zapsány do Tabulky 8.

Tabulka 8: Naměřená data pro laserové tyče s materiálovou poruchou – Praskliny

<i>Číslo tyče</i>	<i>Průměr [mm]</i>	<i>Délka [mm]</i>	<i>WFD</i>	<i>PER [dB]</i>	<i>Porucha</i>
<i>8A206</i>	3,0	50,0	0,20 λ	35,3	PD
<i>8A207</i>	3,0	50,0	0,16 λ	38,2	PC
<i>8A208</i>	3,0	50,0	0,30 λ	40,9	PC
<i>8A209</i>	3,0	50,0	0,25 λ	39,3	PC
<i>8A203</i>	4,5	49,0	0,13 λ	35,1	PD
<i>8A195</i>	6,0	116,0	0,22 λ	41,4	PB
<i>Y938</i>	6,0	116,0	0,13 λ	44,4	PA

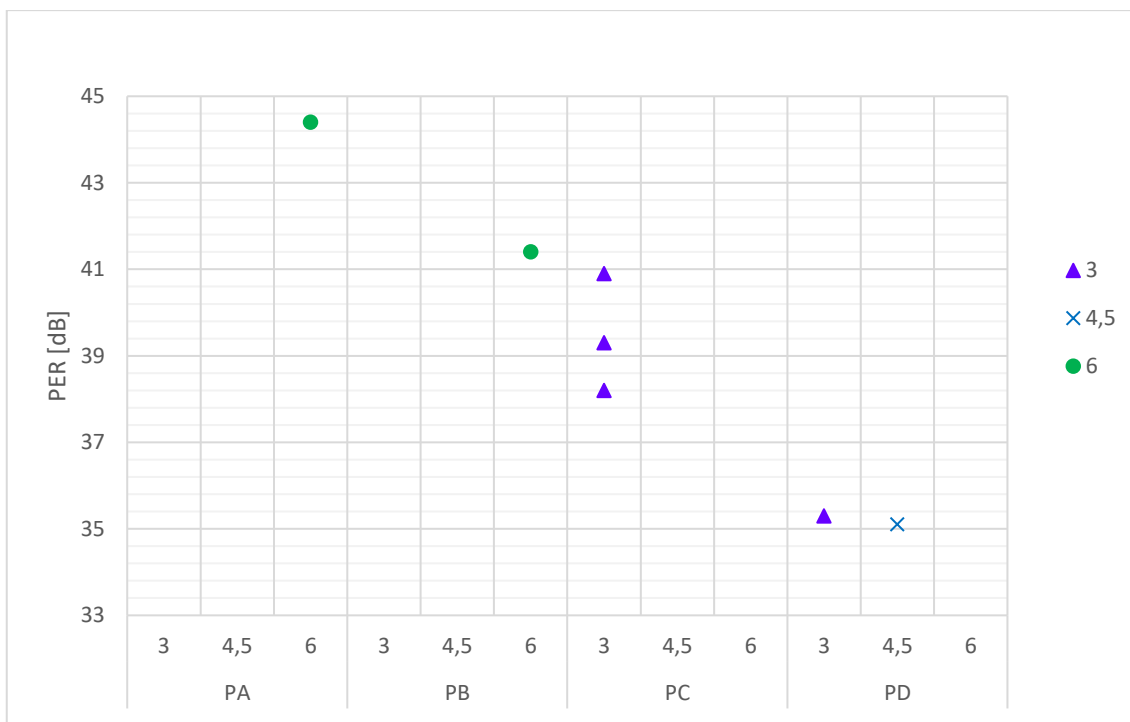
Pozn.: $\lambda = 632,8 \text{ nm}$; nejistoty – rozměr: $+0/-0,05 \text{ mm}$; $WFD = \pm 0,01 \lambda$; $PER = \pm 0,9 \text{ dB}$

U laserových tyčí sledovaného souboru o průměru 3 mm se vyskytují praskliny kategorie PC a PD. Extinkční poměr tyčí kategorie PC se nalézá v rozmezí 38–41 dB, pro laserovou tyč v kategorii PD naměřený extinkční poměr odpovídá hodnotě 35,3 dB, což znamená, že obě kategorie splňují požadavky na hodnotu PER, kategorie PC pro výbornou kvalitu a PD na hranici mezi střední a výbornou kvalitou. Nicméně WFD je pro všechny laserové tyče o průměru 3 mm nad hodnotou 0,15 λ , což znamená, že tyče v tomto ohledu nesplňují kritéria pro vhodnou tyč.

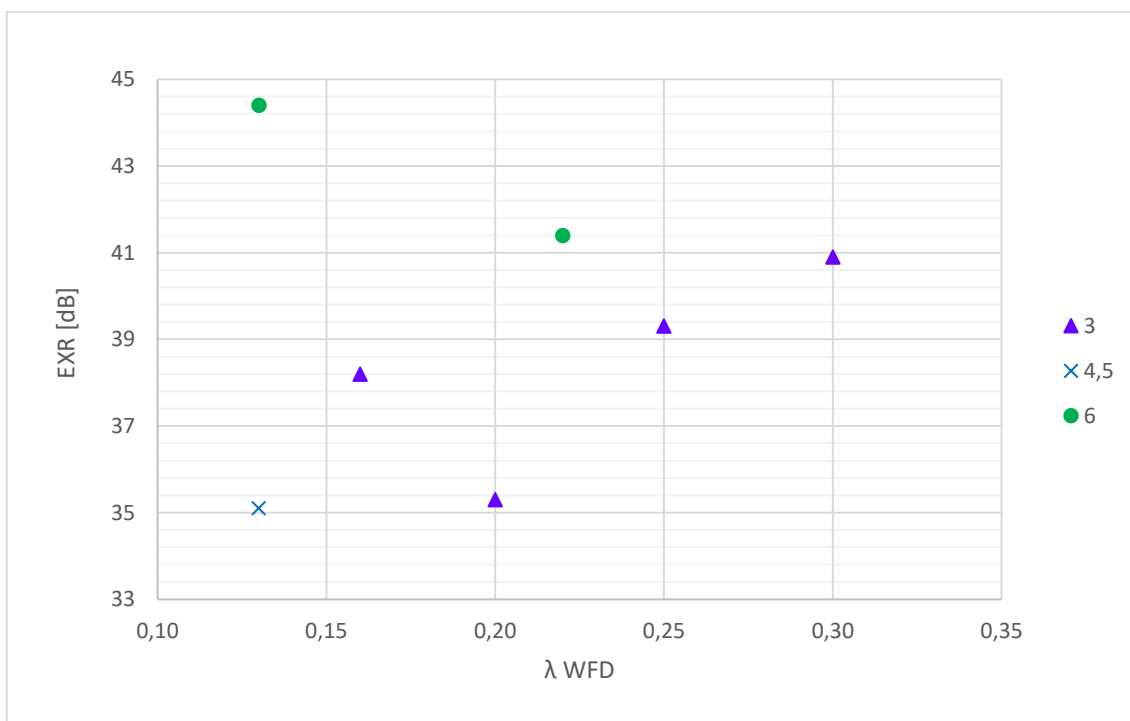
Laserová tyč o průměru 4,5 mm s prasklinami byla v souboru jen jedna. Její hodnota PER je na pomezí výborné a střední kvality a WFD s hodnotou 0,13 λ odpovídá výborné kvalitě.

Laserové tyče o průměru 6 mm s prasklinami byly v souboru dvě. Tyč patřící do kategorie PA dosahovala výborné kvality z pohledu PER i WFD. Tyč kategorie PB dosahovala z hlediska PER také výborné kvality, ale její WFD odpovídá kvalitě střední.

Na Grafu 2 lze pozorovat klesající tendence hodnoty PER v závislosti na závažnosti typu prasklin. Závislosti mezi PER a WFD pro tyče s prasklinami není pozorována (Graf 3).



Graf 2: Závislost PER na kategorii prasklin (PA, PB, PC, PD) s ohledem na průměr tyče (3 mm, 4,5 mm a 6 mm)



Graf 3: Praskliny – závislost WFD na PER s ohledem na průměr laserové tyče (3 mm, 4,5 mm a 6 mm), $\lambda = 632,8 \text{ nm}$

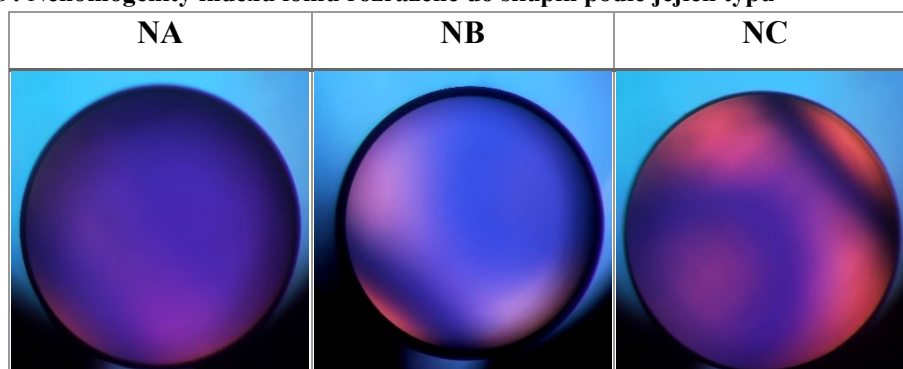
5.3.2 Nehomogenity indexu lomu – „šlíry“

Typy nehomogenit indexu lomu byly rozděleny do tří kategorií (NA, NB a NC) (viz Tabulka 9).

Typy nehomogenit indexu lomu:

- NA – nejmenší závažnost, přechod mezi interferenčními barvami je mírný a méně patrný, nehomogenita je lokalizovaná na části apertury.
- NB – střední závažnost, přechod mezi interferenčními barvami je výrazný, nehomogenita je lokalizovaná na části apertury.
- NC – největší závažnosti, přechod mezi interferenčními barvami je velice výrazný, nehomogenita lze pozorovat v celé apertuře.

Tabulka 9: Nehomogenity indexu lomu rozřazené do skupin podle jejich typu



Tabulka 10: Naměřená data pro laserové tyče s materiálovou poruchou – Nehomogenita indexu lomu

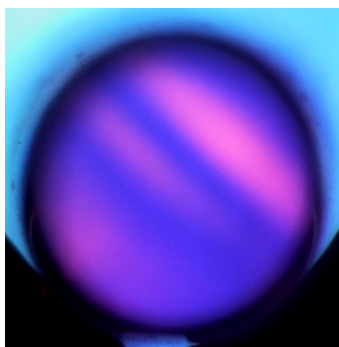
Číslo tyče	Průměr [mm]	Délka [mm]	WFD	PER [dB]	Porucha
8A201	4,5	49,0	0,11 λ	41,7	NA
8A202	4,5	49,0	0,41 λ	37,6	NB
8A200	4,5	49,0	0,39 λ	37,1	NB
3A219	6,0	116,0	0,17 λ	41,4	NA
8A196	6,0	116,0	0,33 λ	32,3	NC
U260	6,0	116,0	0,87 λ	32,0	NC

Pozn.: $\lambda = 632,8 \text{ nm}$; nejistoty – rozměr: $+0/-0,05\text{mm}$; WFD = $\pm 0,01 \lambda$; PER = $\pm 0,9 \text{ dB}$

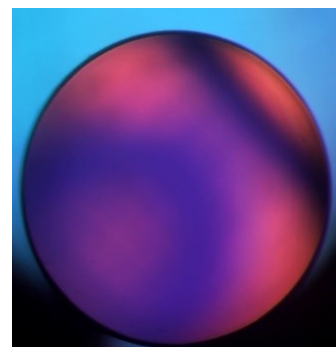
Laserové tyče o průměru 4,5 mm, u kterých byly pozorovány nehomogenity indexu lomu, byly zařazeny, vzhledem k závažnosti nehomogenit, do kategorií NA a NB. Laserová tyč z kategorie NA odpovídala výborné kvalitě, jak vzhledem k PER, tak také vzhledem k hodnotě WFD. Laserové tyče z kategorie NB dosahovaly výborné kvality PER, ale hodnoty WFD byly na pomezí střední a špatné kvality.

Laserové tyče o průměru 6 mm, u kterých byly pozorovány nehomogenity indexu lomu, spadaly do kategorie NA a NC. Laserová tyč z kategorie NA vykazovala výbornou kvalitu z hlediska PER i WFD. Obě tyče z kategorie NC odpovídaly střední kvalitě z hlediska PER, nicméně jejich hodnoty WFD se podstatně lišily. Laserová tyč č. 8A196 dosahovala hodnoty $WFD = 0,33 \lambda$, což odpovídá střední kvalitě a laserová tyč č. U260 měla hodnotu $WFD = 0,87 \lambda$, což odpovídá kvalitě špatné. Tato odlišnost v hodnotě WFD může být pravděpodobně způsobená odlišným rozložením nehomogenity indexu lomu (Obrázek 42, Obrázek 43). Obě laserové tyče byly zařazeny do kategorie NC, jelikož je pozorovaný přechod mezi interferenčními barvami výrazný a nehomogenity se vyskytují v celé apertuře tyče, toto zařazení podporuje také hodnota PER, která je pro obě tyče ~ 32 dB.

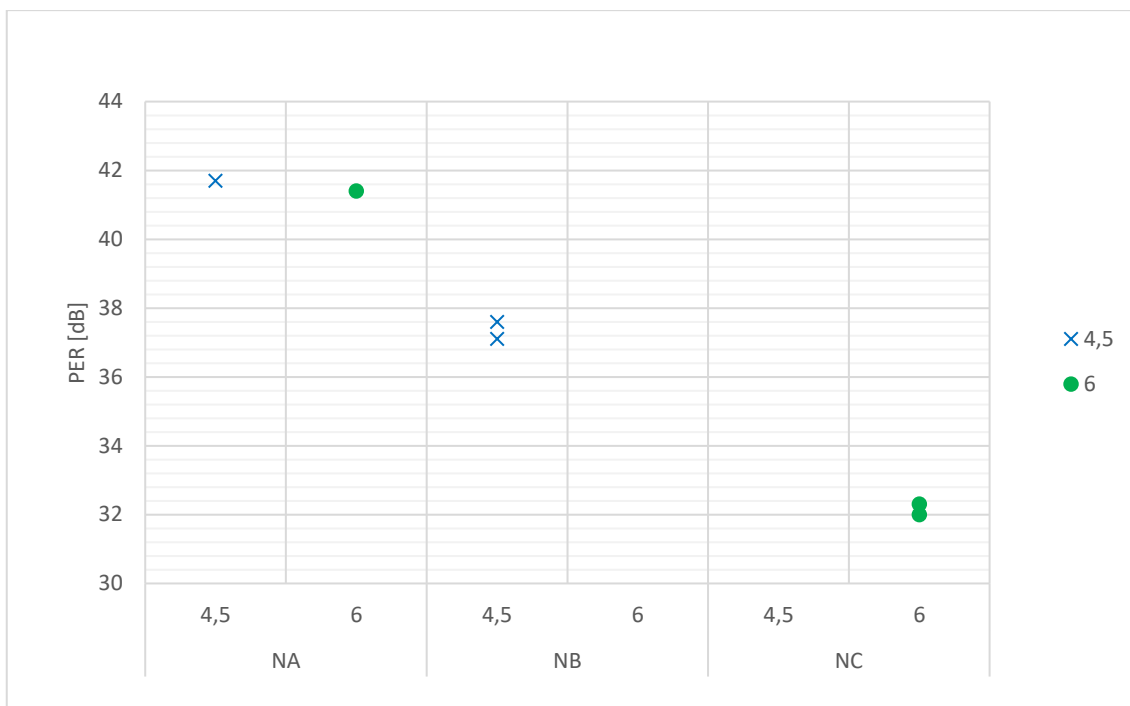
Na Grafu 4 lze pozorovat klesající tendence hodnoty PER v závislosti na závažnosti typu nehomogenity indexu lomu. Na Grafu 5 lze pozorovat jistá závislost mezi PER a WFD, kdy se snižujícím se PER dochází také ke snižování WFD.



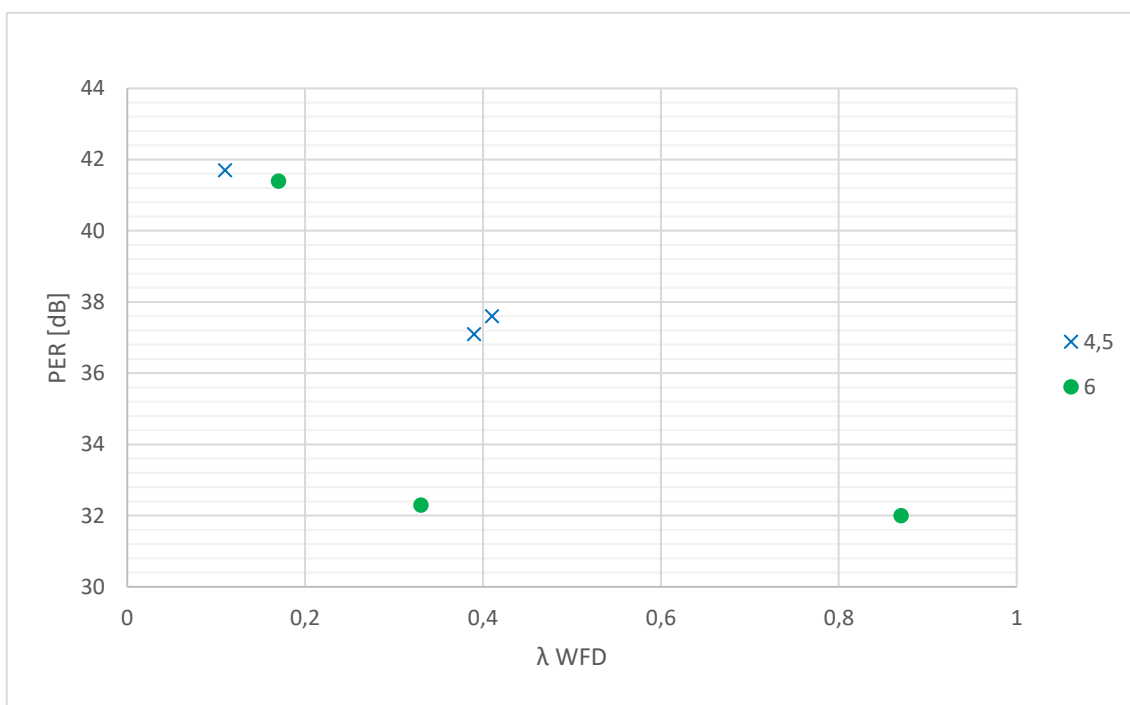
Obrázek 42: Laserová tyč č. 8A196



Obrázek 43: Laserová tyč č. U260



Graf 4: Závislost PER na kategorii nehomogenity indexu lomu (NA, NB, NC) s ohledem na průměr tyče (4,5 mm a 6 mm)



Graf 5: Nehomogenita indexu lomu – závislost WFD na PER s ohledem na průměr laserové tyče (4,5 mm a 6 mm), $\lambda = 632,8 \text{ nm}$

5.4 Poruchy indukované opracováním

Tento typ poruch vzniká v laserové tyči následkem opracování jejího pláště, který se brousí nebo leští. Do sledovaného souboru vzorků byly zařazeny také laserové tyče s nestandardním opracováním pláště. Plášť těchto tyčí je nejprve vyleštěn a potom se jeho část obrousí.

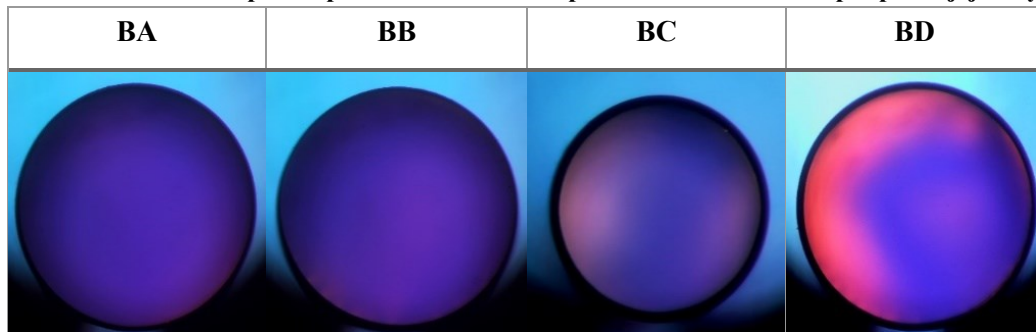
5.4.1 Indukované pnutí – broušení pláště laserové tyče

Typy poruch, způsobené broušením pláště laserové tyče, byly rozděleny do čtyř kategorií (BA, BB, BC a BD) (viz Tabulka 11).

Typy indukovaného pnutí způsobeného broušením pláště:

- BA → BD – rostoucí intenzita interferenčních barev situovaných v okrajových oblastech apertury.

Tabulka 11: Indukované pnutí způsobené broušením pláště rozřazené do skupin podle jejich typu



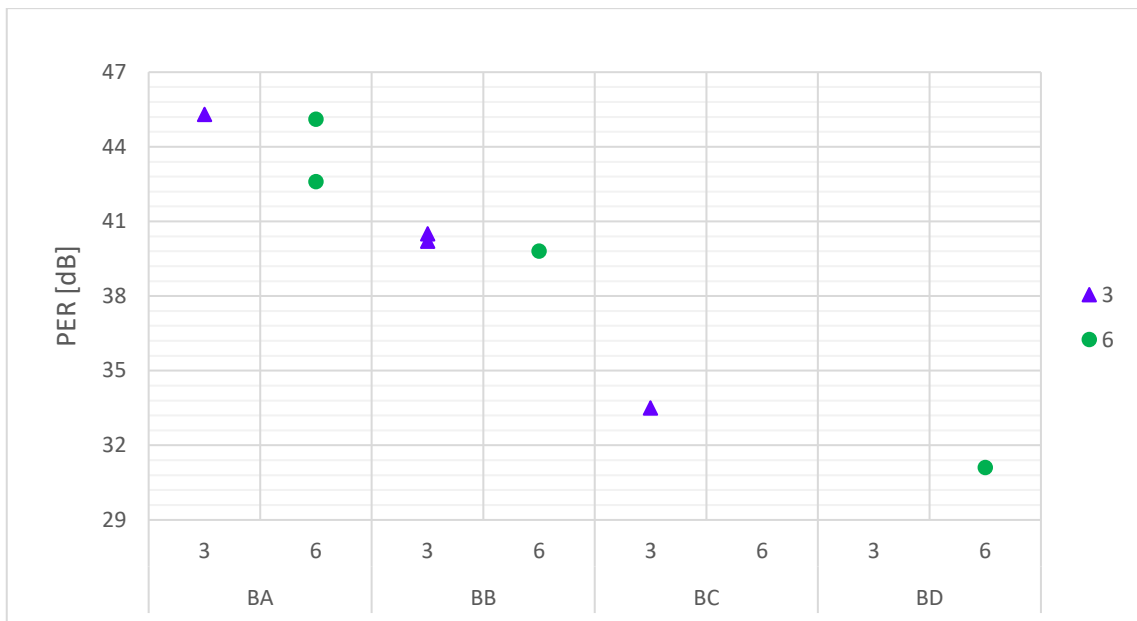
Tabulka 12: Naměřená data pro laserové tyče s poruchami způsobenými broušením pláště

<i>Číslo tyče</i>	<i>Průměr [mm]</i>	<i>Délka [mm]</i>	<i>WFD</i>	<i>PER [dB]</i>	<i>Porucha</i>	<i>Vrstva</i>
2A403	3,0	53,0	0,17 λ	33,5	BC	AR/AR
8A204	3,0	50,0	0,15 λ	40,2	BB	-
8A205	3,0	50,0	0,15 λ	40,5	BB	-
S865	3,0	50,0	0,13 λ	45,3	BA	AR/AR
2A884	6,0	116,0	0,16 λ	39,8	BB	-
3A220	6,0	116,0	0,10 λ	45,1	BA	-
8A194	6,0	116,0	0,21 λ	31,1	BD	-
Z311	6,0	116,0	0,15 λ	42,6	BA	-

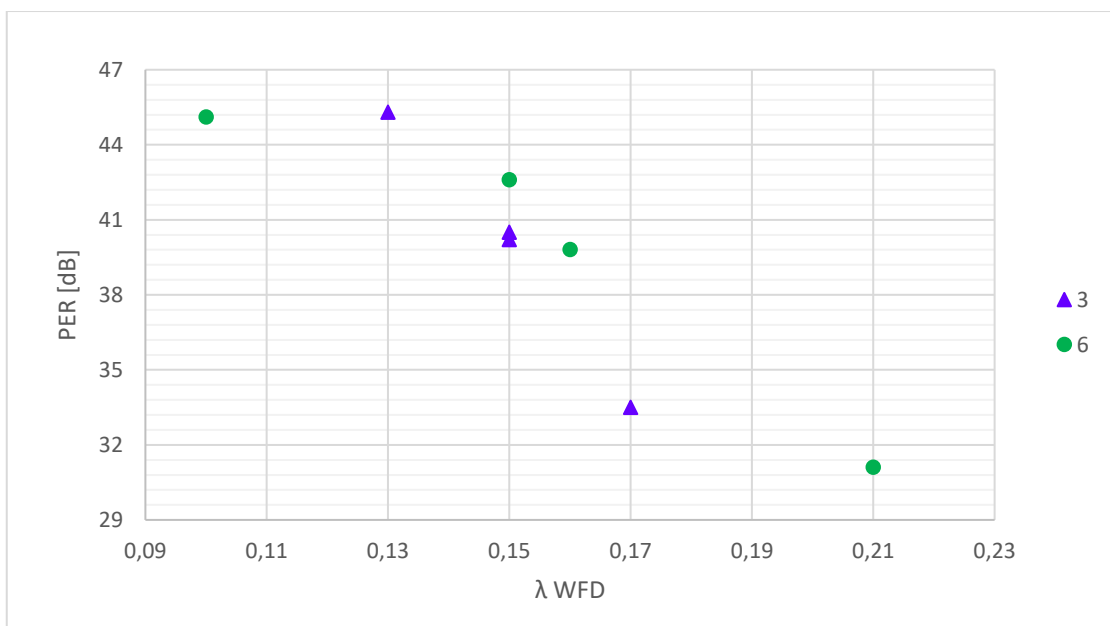
*Pozn.: $\lambda = 632,8 \text{ nm}$; nejistoty – rozměr: $+0/-0,05 \text{ mm}$; $WFD = \pm 0,01 \lambda$; $PER = \pm 0,9 \text{ dB}$
 AR/AR – antireflexní vrstva na obou čelech laserové tyče pro vlnovou délku 1064 nm*

Laserové tyče o průměru 3 mm, u kterých bylo pozorováno indukované mechanické pnutí způsobené broušením jejich pláště, spadají do tří kategorií – BA, BB, BC. Laserová tyč z kategorie BA odpovídá výborně kvalitě z hlediska PER a střední kvalitě z hlediska WFD. Laserové tyče patřící do kategorie BB odpovídají výborné kvalitě z hlediska PER, nicméně jejich hodnota $WFD = 0,15 \lambda$, což odpovídá hraniční hodnotě mezi střední a špatnou kvalitou. Laserová tyč z kategorie BC odpovídá střední kvalitě z hlediska PER, ale vzhledem k hodnotě WFD laserová tyč nesplňuje specifikace.

Laserové tyče o průměru 6 mm, u kterých bylo pozorováno indukované mechanické pnutí způsobené broušením jejich pláště, spadají do tří kategorií – BA, BB, BD. Laserové tyče z kategorie BA i BB odpovídají výborné kvalitě jak z hlediska PER, tak také z hlediska WFD. Laserová tyč z kategorie BD odpovídá střední kvalitě z hlediska PER i WFD.



Graf 6: Závislost PER na kategorii indukovaného pnutí způsobeného broušením pláště (BA, BB, BC, BD) s ohledem na průměr tyče (3 mm a 6 mm)



Graf 7: Indukované pnutí způsobené broušením pláště – závislost WFD na PER s ohledem na průměr laserové tyče (3 mm a 6 mm), $\lambda = 632,8 \text{ nm}$

Na Grafu 6 lze pozorovat klesající tendenci hodnoty PER v závislosti na závažnosti typu indukovaného pnutí. Na Grafu 7 lze pozorovat závislost mezi PER a WFD, kdy se snižujícím PER dochází také ke se snižování WFD.

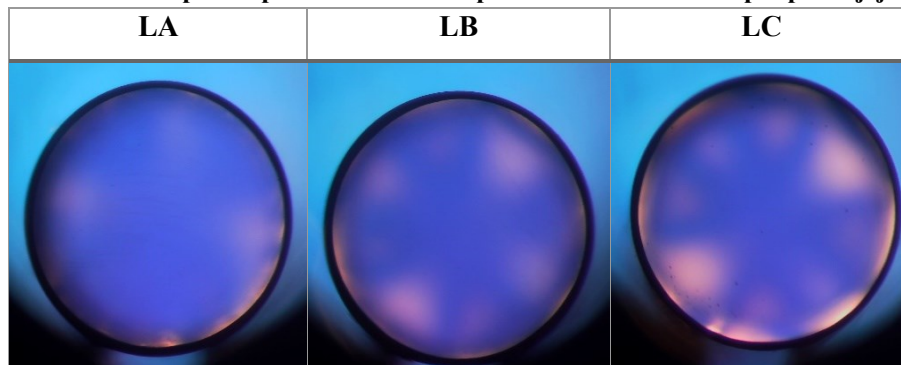
5.4.2 Indukované pnutí – leštění pláště

Typy poruch způsobené leštěním pláště laserové tyče byly rozděleny do tří kategorií (LA, LB, LC) (viz Tabulka 13).

Typy indukovaného pnutí způsobeného leštěním pláště:

- LA → LD – rostoucí intenzita interferenčních barev situovaných v okrajových oblastech apertury.

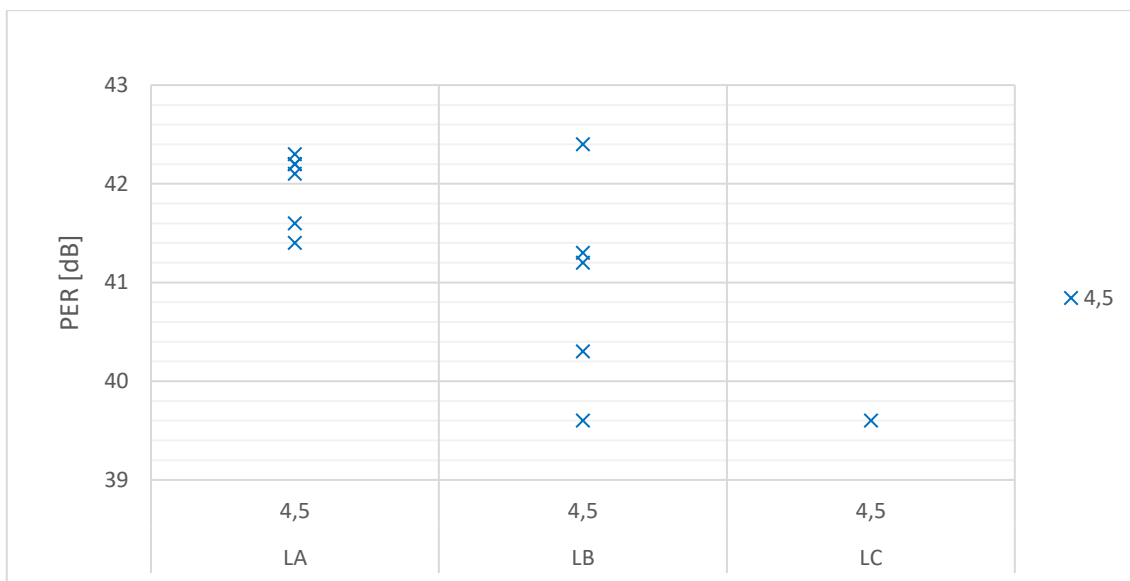
Tabulka 13: Indukované pnutí způsobené leštěním pláště rozřazené do skupin podle jejich typu



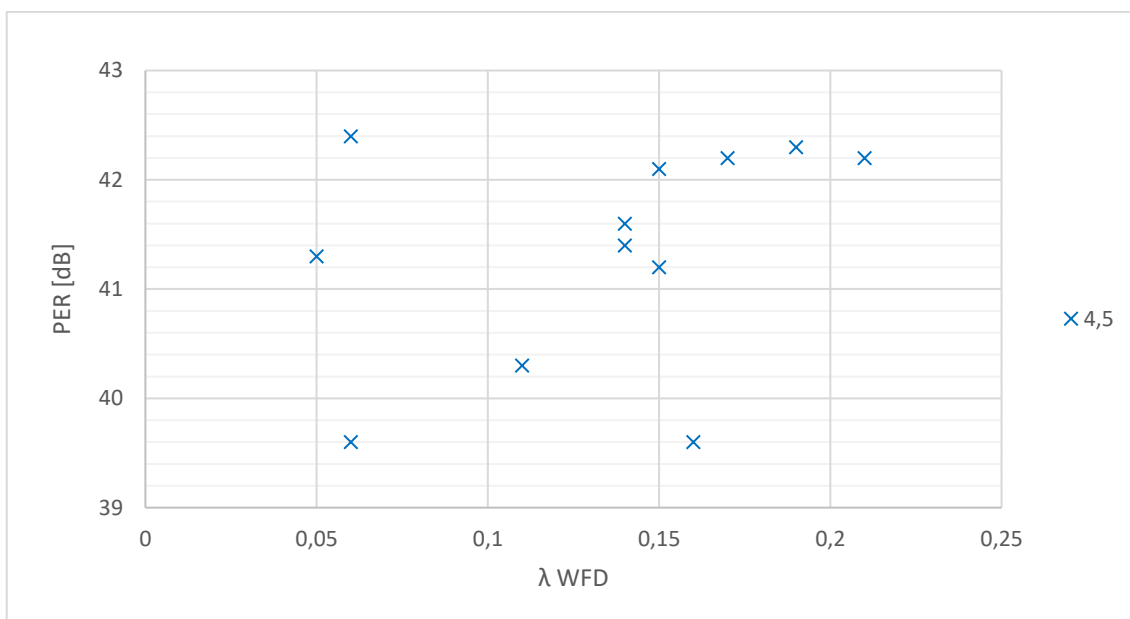
Tabulka 14: Naměřená data pro laserové tyče s poruchou způsobenou leštěním pláště

Číslo tyče	Průměr [mm]	Délka [mm]	WFD	PER [dB]	Porucha
5A019	4,5	49,0	0,15 λ	42,1	LA
5A147	4,5	49,0	0,14 λ	41,4	LA
6A058	4,5	49,0	0,17 λ	42,2	LA
6A095	4,5	49,0	0,21 λ	42,2	LA
6A097	4,5	49,0	0,19 λ	42,3	LA
6A538	4,5	49,0	0,14 λ	41,6	LA
6A547	4,5	49,0	0,15 λ	41,2	LB
6A554	4,5	49,0	0,16 λ	39,6	LB
7A689	4,5	49,0	0,05 λ	41,3	LB
7A694	4,5	49,0	0,06 λ	42,4	LB
7A705	4,5	49,0	0,11 λ	40,3	LB
7A878	4,5	49,0	0,06 λ	39,6	LC

Pozn.: $\lambda = 632,8 \text{ nm}$; nejistoty – rozměr: $\pm 0,05 \text{ mm}$; WFD = $\pm 0,01 \lambda$; PER = $\pm 0,9 \text{ dB}$



Graf 8: Závislost PER na kategorii indukovaného pnutí způsobeného leštěním (LA, LB, LC) laserových tyčí o průměru 4,5 mm



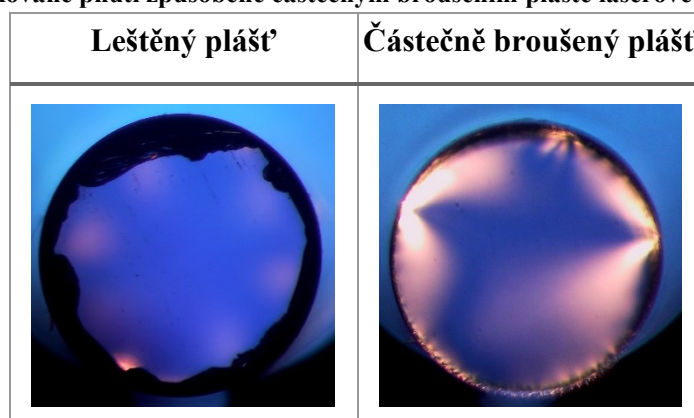
Graf 9: Indukované pnutí způsobené leštěním – závislost WFD na PER pro tyče o průměru 4,5 mm, $\lambda = 632,8 \text{ nm}$

Všechny laserové tyče s leštěným pláštěm ze sledovaného souboru měly průměr 4,5 mm. Tyče ze všech kategorií – LA, LB i LC vykazovaly výbornou kvalitu z hlediska PER, všechny tyče se nacházely v intervalu hodnot PER = 39–43 dB. Jedna laserová tyč z kategorie LA odpovídala svou WFD střední kvalitě, ostatní laserové tyče s leštěným pláštěm z hlediska hodnoty WFD odpovídaly výborné kvalitě.

5.4.3 Idukované pnutí – částečné broušení pláště

V této části jsou studovány laserové tyče o rozměru 3 x 25,1 mm a 4 x 25,1 mm s částečně broušeným pláštěm. Extinkční poměr byl nejprve změřen po naleštění pláště laserové tyče (PER 1 v Tabulce 16), následně byl plášť částečně obroušen a extinkční poměr byl změřen podruhé (PER 2 v Tabulce 16). U těchto tyčí je finální požadovaná hodnota PER min. 23 dB. Deformace vlnplochy byla u tyčí měřena až po částečném obroušení pláště, jelikož pro měření WFD musí být čela laserové tyče přesně naleštěna. Toto opracování čel se provádí až po finálním opracování pláště laserové tyče.

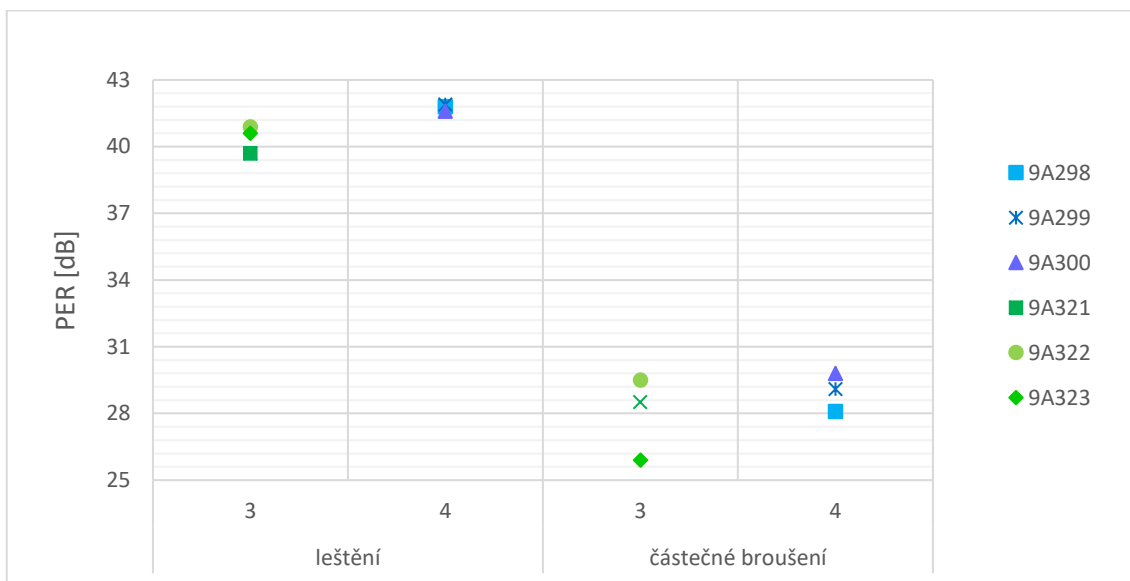
Tabulka 15: Indukované pnutí způsobené částečným broušením pláště laserové tyče



Tabulka 16: Naměřená data pro laserové tyče s materiálovou poruchou – Indukované pnutí způsobené částečným broušením

Číslo tyče	Průměr [mm]	Délka [mm]	WFD	PER 1 [dB]	PER 2 [dB]
9A298	4,0	25,1	0,09 λ	41,8	28,1
9A299	4,0	25,1	0,05 λ	41,9	29,1
9A300	4,0	25,1	0,06 λ	41,6	29,8
9A321	3,0	25,1	0,07 λ	39,7	28,5
9A322	3,0	25,1	0,07 λ	40,9	29,5
9A323	3,0	25,1	0,08 λ	40,6	25,9

Pozn.: $\lambda = 632,8 \text{ nm}$; nejistoty – rozměr: $+0/-0,05\text{mm}$; WFD = $\pm 0,01 \lambda$; PER = $\pm 0,9 \text{ dB}$



Graf 10: Hodnota PER v závislosti na fázi opracování laserových tyčí s finálně částečně broušeným pláštěm s ohledem na jejich průměr (3 mm a 4 mm)

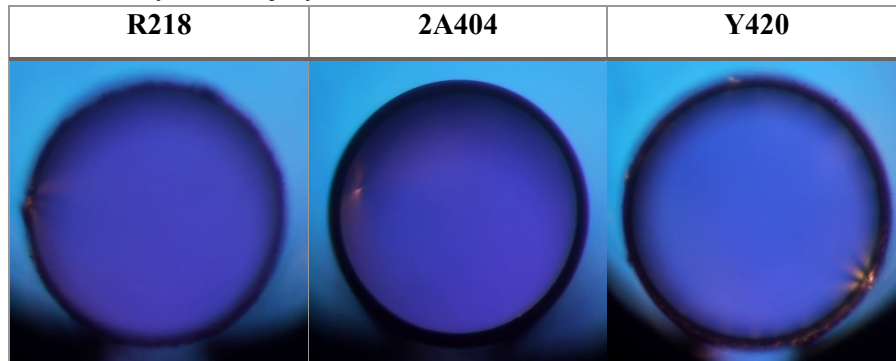
Všechny zkoumané laserové tyče s částečně broušeným pláštěm dosahovaly hodnoty WFD maximálně $0,09 \lambda$, což odpovídá výborné kvalitě. Na této skupině tyčí lze velice dobře pozorovat, jak velký vliv má indukované mechanické pnutí na hodnotu extinkčního poměru. Všechny laserové tyče po naleštění pláště dosahují hodnoty PER v rozmezí (39–42) dB, což odpovídá výborné kvalitě. Následné částečné broušení indukuje v laserových tyčích velké mechanické pnutí, které způsobuje vznik indukovaného dvojlomu, a tudíž lze pozorovat výrazné interferenční barvy (viz Tabulka 15). Po částečném broušení klesla hodnota PER na hodnotu (26–30) dB.

Ze zkoumání tohoto souboru laserových tyčí vyplývá, že mechanické pnutí, které je indukováno opracováním pláště tyče, způsobuje indukci dvojlomu v materiálu tyče. Dvojlom následně způsobuje snížení extinkčního poměru, nicméně v tomto případě nemá velký vliv na hodnotu WFD.

5.4.4 Okrajové defekty

Z celého souboru vzorků měly pouze tři laserové tyče defekt na jejich okraji. Hodnota PER těchto tří tyčí byla nad hodnotou 43 dB, což odpovídá výborné kvalitě. Vysoká hodnota extinkčního poměru je pravděpodobně způsobená skutečností, že při jeho měření prochází laserový svazek He-Ne laseru plochou apertury laserové tyče z cca 80 %, proto okrajové defekty nemusí být při tomto měření zcela zaznamenány.

Tabulka 17: Laserové tyče s okrajovým defektem

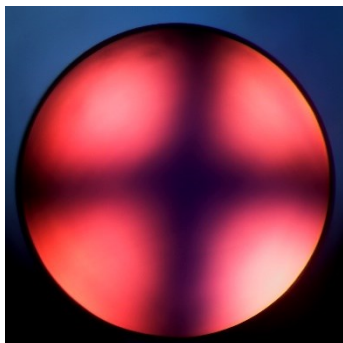


Tabulka 18: Naměřená data pro laserové tyče s materiálovou poruchou – Okrajový defekt

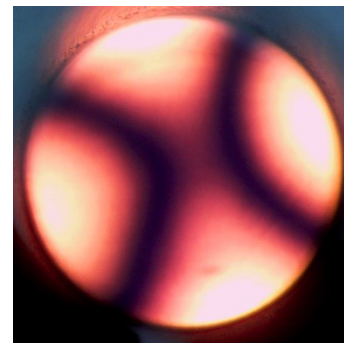
Číslo tyče	Průměr [mm]	Délka [mm]	WFD	PER [dB]	Vrstva
R218	3,0	50,0	0,21 λ	46,7	-
2A404	3,0	53,0	0,10 λ	45,9	AR/AR
Y420	4,5	49,0	0,25 λ	43,3	-

Pozn.: $\lambda = 632,8 \text{ nm}$; nejistoty – rozměr: $+0/-0,05 \text{ mm}$; WFD = $\pm 0,01 \lambda$; PER = $\pm 0,9 \text{ dB}$
AR/AR – antireflexní vrstva na obou čelech laserové tyče pro vlnovou délku 1064 nm

5.5 Extrémní případ nekvalitní laserové tyče



Obrázek 44: Laserová tyč špatné kvality pozorována mezi zkříženými polarizátory – Maltézský kříž



Obrázek 45: Laserová tyč špatné kvality pozorována mezi zkříženými polarizátory – dvě hyperboly

Tabulka 19: Naměřená data pro laserové tyče s velmi špatnou kvalitou

Číslo tyče	Průměr [mm]	Délka [mm]	WFD	PER [dB]
8A016	6,0	116,0	0,70 λ	30,3
8A199	6,0	116,0	1,59 λ	25,2

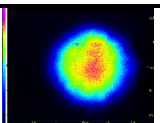
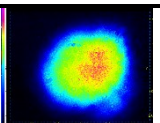
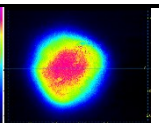
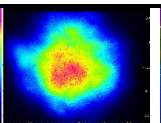
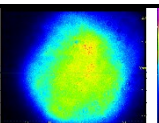
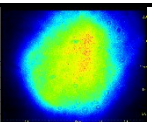
Pozn.: $\lambda = 632,8 \text{ nm}$; nejistoty – rozměr: $+0/-0,05 \text{ mm}$; $WFD = \pm 0,01 \lambda$; $PER = \pm 0,9 \text{ dB}$

Mezi všemi zkoumanými laserovými tyčemi byly dvě tyče o rozměru 6 x 116 mm, kterým byla naměřena velmi vysoká deformace vlnoplochy a nízký extinkční poměr (viz Tabulka 19). Vizualizací mezi zkříženými polarizátory bylo pozorováno zhášení ve tvaru tzv. Maltéžského kříže a při otáčení tyče byla patrna změna kříže na dvě hyperboly.

5.6 Výstupní energie a profil laserového svazku

Pro měření výstupní energie laserového svazku a pozorování jeho profilu byla vybrána skupina tyčí o rozměru 4,5 x 49 mm jak s leštěným, tak s broušeným pláštěm (Tabulka 20) a skupina tyčí o rozměru 6 x 116 mm (Tabulka 21).

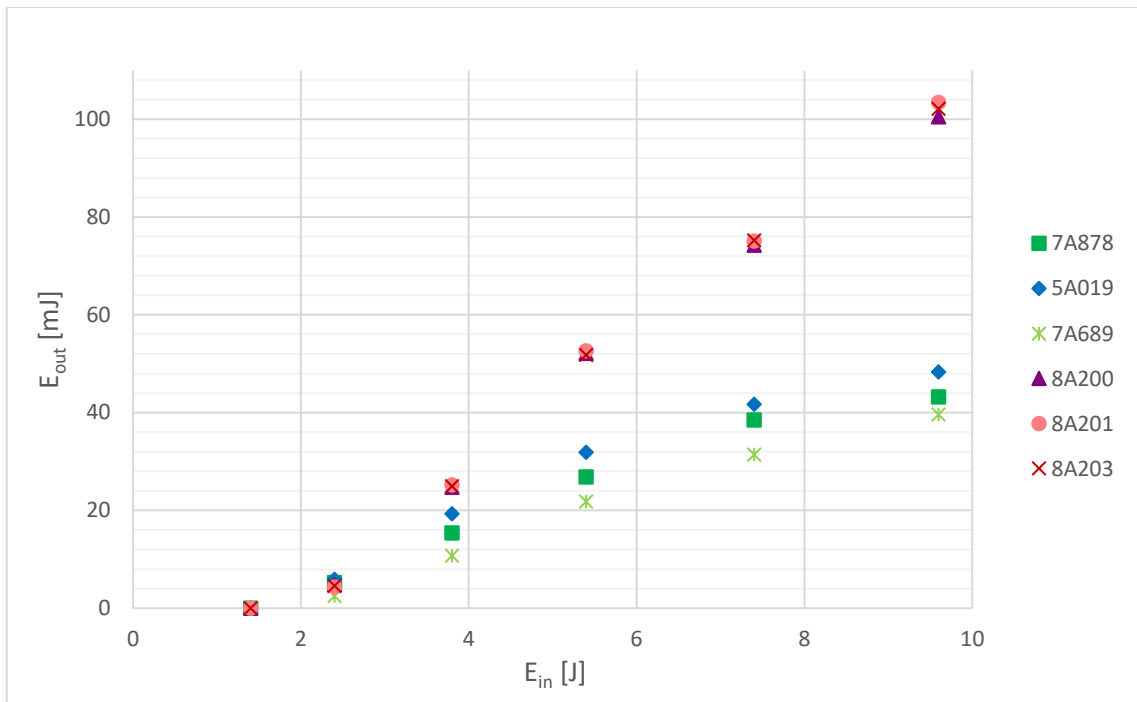
Tabulka 20: Výstupní energie E_{out} pro laserové tyče 4,5 x 49 mm

$E_{in} [J]$	$E_{out} [mJ]$					
	7A878	5A019	7A689	8A200	8A201	8A203
1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,4	5,2	5,9	2,5	4,8	4,3	4,6
3,8	15,4	19,3	10,7	24,7	25,2	24,9
5,4	26,8	31,9	21,8	52,1	52,6	51,8
7,4	38,5	41,7	31,4	74,2	75,1	75,2
9,6	43,2	48,3	39,6	100,5	103,4	102,1
Opracování pláště	leštěný	leštěný	leštěný	broušený	broušený	broušený
Profil svazku						

Pozn.: všechny obrázky profilu svazku zobrazují stejně velkou oblast cca 6 x 5 mm

Na Grafu 11 lze vidět rozdíl mezi výstupní energií E_{out} laserového svazku tyčí s leštěným a broušeným pláštěm. Vyšší hodnota E_{out} laserových tyčí s broušeným

pláštěm je pravděpodobně způsobena homogennější distribucí čerpacího záření (xenonové výbojky) v materiálu. Broušený povrch působí jako difuzní rozhraní, na kterém je čerpací záření rozptýleno.

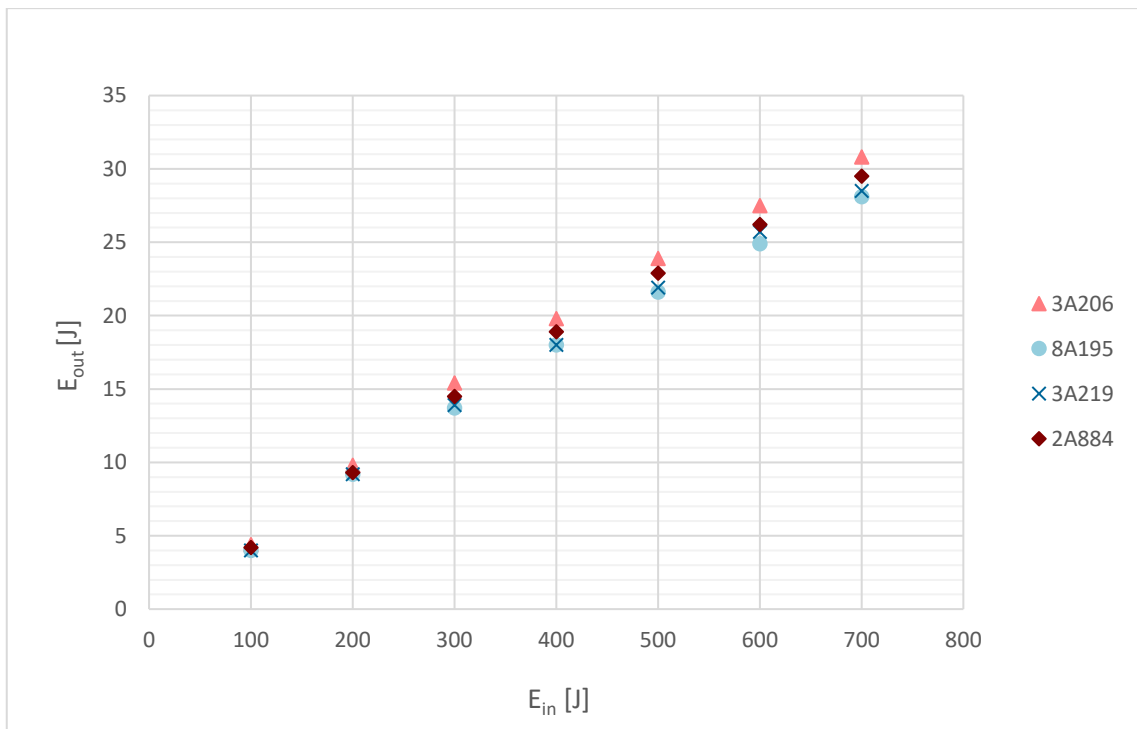


Graf 11: Závislost výstupní energie laserového svazku E_{out} na energii čerpání E_{in} pro laserové tyče 4,5 x 49 mm

Tabulka 21: Výstupní energie E_{out} pro laserové tyče 6 x 116 mm

E_{in} [J]	E_{out} [J]			
	3A206	8A195	3A219	2A884
100	4,4	4,0	4,0	4,2
200	9,8	9,2	9,2	9,3
300	15,4	13,7	13,9	14,5
400	19,8	18,0	18,0	18,9
500	23,9	21,6	21,9	22,9
600	27,5	24,9	25,7	26,2
700	30,8	28,1	28,5	29,5

<i>Profil svazku</i>				
----------------------	--	--	--	--



Graf 12: Závislost výstupní energie laserového svazku E_{out} na energii čerpání E_{in} pro laserové tyče 6 x 116 mm

Z Grafu 12 je patrné, že laserová tyč bez pozorovatelných poruch (3A206) vykazuje nevyšší hodnotu E_{out} , následuje tyč s poruchou indukovanou broušením kategorie BB (2A884), dále tyč s nehomogenitou indexu lomu kategorie NA (3A219) a nejnižší hodnotu výstupní energie vykazuje laserová tyč s prasklinou materiálu – PB (8A195).

6 Diskuse

Zkoumané laserové tyče byly rozděleny do dvou hlavních kategorií podle typů jejich poruch – materiálové poruchy a poruchy indukované opracováním pláště laserové tyče. Do kategorie materiálových poruch, které vznikly při samotném pěstování monokrystalu, byly zařazeny praskliny a nehomogenity indexu lomu. Pokud není pozorován dvojlom, optická indikatrix má v každém místě krystalu tvar koule (Nd: YAG je izotropní krystal – v každém směru má shodný index lomu, pokud nedojde k deformaci tvaru kubických jednotkových buněk krystalické mřížky). Z pozorování laserových tyčí s materiálovou poruchou mezi zkříženými polarizátory lze usuzovat, že optická indikatrix v místě poruchy již nemá tvar koule, ale je deformována do tvaru elipsoidu. Odlišné velikosti indexu lomu pro ortogonální polarizace v různých místech laserové tyče (nehomogenní rozložení dvojlomu) způsobí vznik interferenčních barev při pozorování v bílém světle mezi zkříženými polarizátory. Nehomogenní index lomu materiálu je také zodpovědný za deformování vlnoplochy, která takovýmto materiálem prochází.

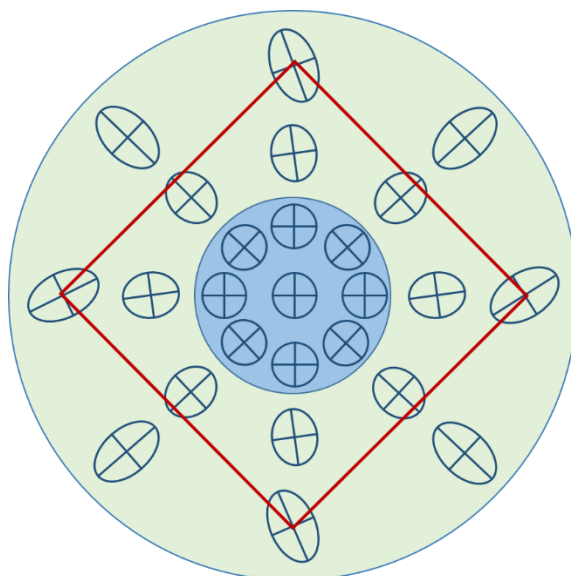
U části laserových tyčí s opracovaným pláštěm byl pozorován radiální gradient dvojlomu. Z tohoto pozorování lze usuzovat, že kubická krystalová mřížka Nd: YAG krystalu může být působením vnějšího smykového mechanického napětí deformována, tím pádem se také deformuje i kulový tvar optické indikatrix do tvaru elipsoidu, což indukuje vznik dvojlomu. U většiny těchto případů ve středu laserové tyče nebyly pozorovány interferenční barvy, což naznačuje, že mechanické napětí bylo indukováno ve větší míře blíže obvodu pláště. To znamená, že krystalová mřížka ve středu laserové tyče nebyla opracováním ovlivněna, tudíž tvar optické indikatrix zde zůstal kulový a interferenční barvy zde nevznikaly – schematicky znázorněno jako modrý kruh na Obrázku 46.

U extrémního případu nekvalitní laserové tyče (viz kapitola 5.5) mezi zkříženými polarizátory bylo pozorováno vyhasínání ve tvaru tzv. Maltézského kříže. Při rotaci dvojice polarizátor – analyzátor vůči krystalu, respektive při rotaci krystalu vůči dvojici polarizátor – analyzátor, přecházel obrazec vyhasínání do tvaru dvou hyperbol. To je

podobné pozorování dvojlomných krystalů v konoskopickém uspořádání mikroskopu. V našem případě metody vizualizace mechanického pnutí mezi zkříženými polarizátory bylo použito ortoskopické osvětlení krystalu. Obraz, odpovídající pseudo-konoskopickému pozorování, byl nejspíše způsoben velkým vnějším tepelným či mechanickým napětím, které způsobilo deformaci kubické krystalové mřížky. Ačkoliv tečné mechanické napětí indukované opracováním, které působí vznik smykového napětí, je na obvodu laserové tyče stejné a také tepelný gradient při pěstování má směr radiály, nevzniká radiálně symetrické rozložení optických indikatrix vůči ose krystalu. To je způsobeno tím, že ačkoliv krystal navenek vypadá jako osově symetrický vůči libovolnému pootočení, je tvořen mikroskopickou kubickou soustavou s čtyřčetnou osou symetrie. Proto deformace působila nejen v kolmém směru na stěny jednotkové buňky krystalové mřížky, ale také ve směru diagonál stěn. Toto způsobilo vznik rozložení optických indikatrix s dobře patrnou čtyřčetnou symetrií – deformace působící v kolmém směru na stěny jednotkových buněk způsobily vznik rotačně symetrických elipsoidů a deformace, které působily ve směru diagonál stěn, způsobily vznik obecných elipsoidů pootočených vůči radiále (náhorně na Obrázku 46 řezu elipsoidů podél obvodu).

Pozorování konoskopického obrazce – Maltézského kříže, pravděpodobně způsobila vzrůstající elipticita elipsoidů se zvětšující se vzdáleností od středu laserové tyče, přičemž i ve středu tyče byl pozorován dvojlom, tudíž v tomto případě nebylo napětí indukováno pouze po obvodu, ale zasahovalo až do středu laserové tyče. Při otáčení laserové tyče mezi zkříženými polarizátory vyhasínání v Maltézském kříži přecházelo do vyhasínání ve tvaru dvou hyperbol, což potvrzuje pravděpodobný vznik jak rotačních elipsoidů v kolmých směrech deformace stěn jednotkových krystalových buněk, tak také obecných pootočených elipsoidů při deformaci ve směrech diagonál stěn. Pokud jsou totiž optické indikatrix nesymetricky umístěné podél obvodu, při otáčení krystalu mezi zkříženými polarizátory dochází ke změně obrazce vyhasínání.

Skupina laserových tyčí, které nejevily při vizualizaci mezi zkříženými polarizátory žádné interferenční barvy, měla ve všech případech hodnotu extinkčního poměru větší než 45 dB a deformaci vlnplochy menší než $0,11 \lambda$. To odpovídá tomu, že krystaly s malým dvojlomem minimálně převádějí lineární polarizaci světla na eliptickou, a tedy mají nízkou hodnotu extinkčního poměru.



Obrázek 46: Řezy optických indikatrix deformované působením smykového mechanického napětí v rovině kolmé na osu laserové tyče: modrý kruh – ve středu laserové tyče mají indikatrix tvar koule, dvojlom není pozorován; zelené mezikruží – zde mají indikatrix tvar elipsoidu se vzrůstající elipticitou směrem k obvodu, dvojlom je pozorován; červený čtverec – zastupuje orientaci kubické soustavy s čtyřčetnou osou symetrie krystalu

Laserové tyče 3 x 50 mm s materiálovou poruchou – praskliny (PC, PD) odpovídaly hodnotou deformace vlnoplochy špatné kvality. Hodnota PER byla u všech těchto tyčí vyšší než 35 dB. Nejmírnější porucha laserové tyče indukovaná broušením pláště (BA) odpovídala výborné kvalitě z hlediska PER a střední kvalitě WFD. Laserové tyče s větším indukovaným pnutím (BB, BC) tolerance pro kvalitu z hlediska WFD nesplňovaly.

Laserové tyče 4,5 x 49 mm a 6 x 116 mm, u kterých se vyskytovaly praskliny, specifikace pro PER i WFD splňovaly. Co se týče poruchy typu nehomogenita indexu lomu, bylo zjištěno, že specifikacím odpovídá jen kategorie NA. Laserové tyče s broušeným pláštěm rozměru 6 x 116 mm splňovaly specifikace PER i WFD pro typy poruch BA, BB i BD. Všechny laserové tyče s leštěným pláštěm rozměru 4 x 49 mm splňovaly specifikace PER i WFD.

Bylo zjištěno, že okrajové defekty laserových tyčí jsou velice specifickým typem poruchy. Předpokládá se, že pomocí měření extinkčního poměru pravděpodobně nemohou být detekovány. Měřicí laserový svazek He-Ne laseru prochází při tomto měření cca 80 % plochy apertury laserové tyče, je tudíž pravděpodobné, že laserový svazek tyto poruchy nezachytí a prochází pouze homogenní částí tyče.

U laserových tyčí s částečně broušeným pláštěm bylo pozorováno, že částečné obroušení pláště má za následek indukci velkého mechanického pnutí, které výrazně snižuje hodnotu extinkčního poměru, přičemž bylo ověřeno, že deformace vlnoplochy těchto tyčí zůstává velice nízká $\sim 0,09 \lambda$.

Dále bylo zjištěno, že výstupní energie laserového svazku tyčí 4,5 x 49 mm s leštěným pláštěm má nižší hodnotu než výstupní energie laserového svazku tyčí s pláštěm broušeným. Dá se usuzovat, že broušený plášť, jakožto difuzní prostředí, homogenizuje rozložení čerpacího záření xenonové výbojky v materiálu laserové tyče, čímž se stává čerpání efektivnějším a výstupní energie je tudíž vyšší.

7 Závěr

V teoretické části této diplomové práce je pojednáváno o monokrystalech a jejich využití v pevnolátkových laserech, dále o laserových tyčích Nd: YAG a současných metodách kontroly jejich optické kvality.

Experimentální část této práce byla zaměřena především na inovaci současně používaných metod kontroly optické kvality laserových tyčí. Nejprve byla upravena aparatura pro pozorování mechanického pnutí a poruch laserových tyčí tak, aby subjektivní pozorování bylo nahrazeno kamerovým snímáním. Proto byla vytvořena počítačová vizualizace mechanického pnutí a poruch v laserových tyčích, díky které je možno uchovávat obrazy mechanického pnutí jednotlivých laserových tyčí. Z pořízených obrazů byly vytvořeny tabulky jednotlivých typů poruch, které byly seřazeny podle závažnosti.

Dále byla připravena aparatura pro automatické měření extinkčního poměru. Sestavení tohoto měření a naprogramování správné funkčnosti bylo časově nejnáročnější. Po provedení měření extinkčního poměru souboru laserových tyčí byla zkoumána závislost mezi pnutím, které bylo vizualizováno mezi zkříženými polarizátory, a hodnotou extinkčního poměru. Bylo ověřeno, že pro jednotlivé kategorie poruch se se zvyšující intenzitou interferenčních barev snižuje extinkční poměr.

Třetím provedeným měřením bylo měření deformace vlnoplochy v Zygo interferometru typu Fizeau. Bylo zjištěno, že laserové tyče rozměru 3 x 50 mm splňují specifikace pro výbornou kvalitu pouze v případě, že je mezi zkříženými polarizátory pozorován homogenní obraz. Laserové tyče 4,5 x 49 mm a 6 x 116 mm, které obsahovaly praskliny a nejméně závažný typ nehomogenity indexu lomu (NA) splnily kritéria pro dostatečnou kvalitu z hlediska PER i WFD. Všechny laserové tyče 6 x 116 mm s poruchami indukovanými broušením pláště a všechny laserové tyče 4,5 x 49 mm s leštěným pláštěm odpovídaly specifikacím dostatečné kvality.

Nakonec byla u několika vybraných laserových tyčí o rozměru 4,5 x 49 mm (3 kusy s leštěným pláštěm a 3 kusy s broušeným pláštěm) a 6 x 116 mm (4 kusy) měřena výstupní energie laserového svazku při zvyšující se hodnotě čerpací energie. Nejvyšší

hodnotu výstupní energie $E_{out} = 30,8$ J při energii čerpání $E_{in} = 700$ J měla laserové tyč rozměru 6 x 116 mm, ve které nebyly pozorovány žádné poruchy. Nejnižší hodnotu výstupní energie $E_{out} = 28,1$ J při stejné čerpací energii měla laserová tyč s prasklinou přes střed apertury. Bylo zjištěno, že laserové tyče o rozměru 4,5 x 49 mm s broušeným pláštěm měly hodnotu výstupní energie laserového svazku $E_{out} \sim 100$ mJ a tyče s leštěným pláštěm $E_{out} \sim 40$ mJ při shodné energii čerpání $E_{in} = 9,6$ J. Toto měření bylo provedeno laserovou laboratoří v Crytur spol. s r. o.

Tato práce určila slibný směr pro zvýšení ekonomizace procesu opracování laserových tyčí. Díky vytvořeným tabulkám jednotlivých poruch a nehomogenit bude usnadněna jejich identifikace a také teoretický odhad velikosti ostatních sledovaných parametrů. Provedená měření sloužila především k ověření funkčnosti inovovaných metod kontroly optické kvality laserových tyčí a také k pokusu o nalezení závislosti mezi jednotlivými sledovanými parametry. Inovované metody se podařilo zprovoznit a také se podařilo nalézt závislosti mezi jednotlivými parametry. V návaznosti na tuto práci by v dalším kroku mělo následovat provedení a vyhodnocení měření na obsáhlejších vzorku laserových tyčí, aby byla ověřena statistická spolehlivost.

Při následném pokračování vývoje metod optické kontroly kvality laserových tyčí, by z dosavadní optické sestavy pro měření extinkčního poměru mohl být sestaven plně automatizovaný kompaktní přístroj. Také zdokonalená metoda digitalizace obrazů poruch a pnutí v laserových tyčích skýtá prostor pro další inovace. Konkrétně jde o použití zpracování obrazu k posouzení závažnosti jednotlivých poruch na základě vyhodnocení interferenčních barev.

Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. *Fundamentals of Photonics*. 2nd ed. Hoboken, N.J: Wiley Interscience, 2007. Wiley Series in Pure and Applied Optics. ISBN 978-0-471-35832-9.
- [2] KAMINSKIĀ, A. A. *Laser Crystals: Their Physics and Properties*. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1981. Springer Series in Optical Sciences. ISBN 978-3-540-09576-7.
- [3] MALÝ, Petr. *Optika*. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-80-246-1342-0.
- [4] SALEH, Bahaa E. A, Malvin Carl TEICH a Miloslav DUŠEK. *Základy foton[i]ky*. Sv. 3 Sv. 3. Praha: Matfyzpress, 1995. ISBN 978-80-85863-00-0.
- [5] KOECHNER, Walter. *Solid-state Laser Engineering*. 6th rev. and updated ed. New York, NY: Springer, 2006. Springer Series in Optical Sciences, 1. ISBN 978-0-387-29094-2.
- [6] HECHT, Jeff. Laser | definition, acronym, principle, applications, & types. *Encyclopedia Britannica*. [vid. 2020-02-28]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/laser>
- [7] VRBOVÁ, Miroslava. *Lasery a moderní optika*. 1. Praha: Prometheus, 1994. ISBN 978-80-85849-56-1.
- [8] LEONARDO TECHNOLOGY S.R.O. *Možné dělení typů a druhů laserů*. [vid. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://bit.ly/2x0AiSR>
- [9] PASCHOTTA, Rüdiger. Gain media. *RP Photonics Encyclopedia*. [vid. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://bit.ly/2XFKQE4>
- [10] VRBOVÁ, Miroslava, Petr GAVRILOV a Helena JELÍNKOVÁ. *Úvod do laserové techniky*. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 978-80-01-01108-9.
- [11] PASCHOTTA, Rüdiger. Modes. *RP Photonics Encyclopedia*. [vid. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://bit.ly/3gxslot>
- [12] SCOTT, W. C. a M. DE WIT. Birefringence compensation and TEM₀₀ mode enhancement in a Nd: YAG laser. *Applied Physics Letters*. 1971, **18**(1), 3–4. Dostupné z: doi:10.1063/1.1653466
- [13] NITSCH, K., K. BLAŽEK, J. DRÁPALA, M. NEVŘIVA, M. RŮŽIČKA a J. SEDLÁČEK. *1. Škola růstu krystalů v roce 2000*. Československá společnost pro růst krystalů, 2000 [vid. 2020-05-28]. ISBN 80-85912-36-8. Dostupné z: <https://bit.ly/33Qxd6R>

- [14] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky – Struktura a vlastnosti pevných látek*. 2006 [vid. 2019-12-17].
Dostupné z: <https://bit.ly/3gGVq6u>
- [15] ZELENKA, Petr. *Periodická tabulka prvků – Iridium*. [vid. 2019-12-17].
Dostupné z: <https://bit.ly/2zwTiO1>
- [16] ZELENKA, Petr. *Periodická tabulka prvků – Molybden*. [vid. 2019-12-17].
Dostupné z: <https://bit.ly/2AekW2e>
- [17] DAI-ICHI KIDEN. *Crystal Growth – High-frequency Induction Heating and Hot Press, Induction Heating Apparatus*. [vid. 2020-03-14].
Dostupné z: <https://bit.ly/2XDquLE>
- [18] NITSCH, Karel, Miroslava RODOVÁ a Karel NEJEZCHLEB. Pěstování krystalů Czochralskiho metodou. In: *2. Škola růstu krystalů*. Praha: Československá společnost pro růst krystalů, 2002. ISBN 80-85912-86-4.
- [19] METELKA, Ondřej. *Charakterizace struktur připravených selektivním mokřým leptáním křemíku*. VUT v Brně. 2014 [vid. 2020-03-18].
Dostupné z: <https://bit.ly/2Bczvnl>
- [20] XIAO, Qiang a Jeffrey J. DERBY. Heat transfer and interface inversion during the Czochralski growth of yttrium aluminum garnet and gadolinium gallium garnet. *Journal of Crystal Growth*. 1994, **139**(1), 147–157. ISSN 0022-0248.
Dostupné z: doi:10.1016/0022-0248(94)90039-6
- [21] KALISKY, Yehoshua Y. *The Physics and Engineering of Solid State Lasers*. Bellingham, Wash.: SPIE, 2006. ISBN 978-0-8194-8046-0.
- [22] WEBB, Colin E. a Julian D. C. JONES, ed. *Handbook of Laser Technology and Applications*. B.m.: Philadelphia: Institute of Physics, 2004.
ISBN 978-0-7503-0607-2.
- [23] KŘÍŽ, David. *Úvod do krystalografie a strukturní analýzy*. Karlova Univerzita, Matematicko-fyzikální fakulta. 2000. Dostupné z: <https://bit.ly/2Xe8RmJ>
- [24] DEB, K. K. Guidelines for specifying optical homogeneity of laser rods using interferometry. *Materials Research Bulletin*. 1982, **17**(11), 1461–1464.
ISSN 0025-5408. Dostupné z: doi:10.1016/0025-5408(82)90233-1
- [25] DHANARAJ, Govindhan, ed. *Springer Handbook of Crystal Growth*. Heidelberg; New York: Springer, 2010. ISBN 978-3-540-74182-4.
- [26] POLCAROVÁ, Milena. Rentgenová topografie. *Materials Structure*. 2002, **Vol. 9**(No.1). Dostupné z: <https://bit.ly/3c9sG2v>
- [27] BURNS, R., A. CHUMAKOV a S. CONNELL. HPHT growth and x-ray characterization of high-quality type IIa diamond. *Journal of Physics. Condensed Matter: an Institute of Physics Journal*. 2009, **21**, 364224.
Dostupné z: doi:10.1088/0953-8984/21/36/364224

- [28] CRYTUR SPOL. S R.O. *Nd: YAP* | *Crytur.cz*. [vid. 2019-11-30].
Dostupné z: <https://bit.ly/2U4gYjR>
- [29] REDA, S. M., C. R. VARNEY a F. A. SELIM. Radio-luminescence and absence of trapping defects in Nd-doped YAG single crystals. *Results in Physics*. 2012, **2**, 123–126. ISSN 2211-3797. Dostupné z: doi:10.1016/j.rinp.2012.09.007
- [30] POKHREL, M., N. RAY, G. A. KUMAR a D. K. SARDAR. Comparative studies of the spectroscopic properties of Nd³⁺: YAG nanocrystals, transparent ceramic and single crystal. *Optical Materials Express*. 2012, **2**(3), 235–249. ISSN 2159-3930. Dostupné z: doi:10.1364/OME.2.000235
- [31] EAKINS, D. E, M HELD, M. G NORTON a D. F BAHR. A study of fracture and defects in single crystal YAG. *Journal of Crystal Growth*. 2004, **267**(3), 502–509. ISSN 0022-0248. Dostupné z: doi:10.1016/j.jcrysgro.2004.04.011
- [32] CRYTUR SPOL. S R.O. Lasers | *Crytur.cz*. [vid. 2019-06-04].
Dostupné z: <https://bit.ly/3doAsHz>
- [33] WEBER, M. J., M. BASS, K. ANDRINGA, R. R. MONCHAMP a E. COMPERCHIO. Czochralski growth and properties of YAlO₃ laser crystals. *Applied Physics Letters*. 1969, **15**(10), 342–345. ISSN 0003-6951. Dostupné z: doi:10.1063/1.1652851
- [34] CRYTUR SPOL. S R.O. *Laser rods – Neodymium doped* | *Crytur.cz*. [vid. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://bit.ly/2ZKWrnS>
- [35] NEJEZCHLEB, Karel. Osobní sdělení. 2019
- [36] KVAPIL, Jiří, Josef KVAPIL, Stanislav SKLENÁŘ, Jiří KUBELKA a Bohumil PERNER. Způsob volby prostředí pro temperaci monokrystalů yttritohlinitého granátu. 223542. 1. květen 1984. [vid. 2020-03-15].
Dostupné z: <https://bit.ly/3dckkIJ>
- [37] LU, Jia-fang, H. YAGI, K. TAKAICHI, T. UEMATSU, J.-F BISSON, Yan FENG, A. SHIRAKAWA, Ken-ichi UEDA, T. YANAGITANI a A.A. KAMINSKII. 110 W ceramic Nd³⁺: Y₃Al₅O₁₂ laser. *Applied Physics B*. 2004, **79**, 25–28. Dostupné z: doi:10.1007/s00340-004-1511-9
- [38] *Neodymium doped YAG*. [vid. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://bit.ly/2yHHNmn>
- [39] SUN, Zhe, Qitong CHENG, Yongling HUI, Menghua JIANG, Hong LEI a Qiang LI. Enhancing extinction ratio of polarization and pulse stability simultaneously from passively Q-switched [100]-Nd:YAG/[110]-Cr⁴⁺:YAG laser. *Optics Communications*. 2015, **335**, 245–249. Dostupné z: doi:10.1016/j.optcom.2014.09.005
- [40] GOODWIN, Eric P. a James C. WYANT. *Field Guide to Interferometric Optical Testing*. Bellingham, Wash: SPIE Press, 2006. SPIE field guides. ISBN 978-0-8194-6510-8.

- [41] AI, Chiayu a James C. WYANT. Measurement of the inhomogeneity of a window. *Optical Engineering*. 1991, **30**(9), 1399–1405. ISSN 0091-3286, 1560-2303. Dostupné z: doi:10.1117/12.55928
- [42] NOVÁK, Jiří, Pavel NOVÁK a Antonín MIKŠ. Vyhodnocení laboratorního měření deformací vlnoplochy s užitím Matlabu. 2005 [vid. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://bit.ly/2TNwOz0>
- [43] DEB, K. K. Optical analysis of internal strains in laser rods using interferometry. *Applied Optics*. 1981, **20**(24), 4146–4147. ISSN 2155-3165. Dostupné z: doi:10.1364/AO.20.004146
- [44] HARIHARAN, P. *Optical interferometry*. 2nd ed. Amsterdam; Boston: Academic Press, 2003. ISBN 978-0-12-311630-7.
- [45] JAGGI, Neena a D.R. VIJ. Fourier transform infrared spectroscopy. In: *Handbook of Applied Solid State Spectroscopy*. 2007, s. 411–450. Dostupné z: doi:10.1007/0-387-37590-2_9
- [46] KAJTOCH, Dariusz. *Novel Schemes for Generation of Strongly Squeezed Atomic States*, 2015. Dostupné z: <https://bit.ly/3gxmZPv>
- [47] ZYGO, Corporation. *MetroPro Reference Guide OMP-0347K*
- [48] DE GROOT, Peter J., Leslie L. DECK a Torsten GLASCHKE. Characterizing the resolving power of laser Fizeau interferometers. In: *Fifth European Seminar on Precision Optics Manufacturing: Fifth European Seminar on Precision Optics Manufacturing*. Teisnach, Germany: SPIE, 2018, s. 6 [vid. 2020-03-19]. ISBN 978-1-5106-2270-8. Dostupné z: doi:10.1117/12.2317630
- [49] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky – Zobrazovací vady čoček*. 2006 [vid. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://bit.ly/2yFMlcM>
- [50] PERKINELMER. *High Performance Flash and Arc Lamps*. Dostupné z: <https://bit.ly/2TNMSRv>
- [51] *Thorlabs APT Controllers Host-Controller Communications Protocol*. 2019. Dostupné z: <https://bit.ly/3ceRB4O>