

## Úloha 6: Nelineární transmise saturovatelných absorbérů

Datum měření: 18.3.2015  
Zpracoval: David Roesel  
Spolupracovala: Tereza Schönfeldová

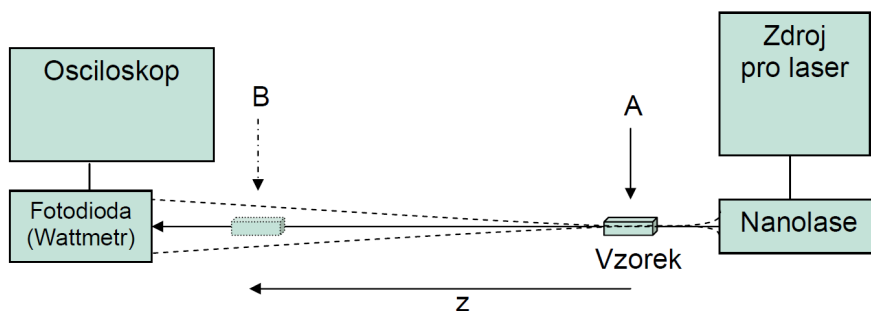
Skupina: G  
Kruh: FE  
Klasifikace:

### 1 Úvod

Jednou z metod generace krátkých pulsů je používání saturovatelných absorbérů v rezonátoru laseru. V této úloze jsme si vyzkoušeli práci se saturovatelnými absorbéry a studovali jsme jejich fungování za použití pulsního mikročipového laseru. Věnovali jsme se měření některých parametrů laseru a nelineární transmise dvou různě dlouhých saturovatelných absorbérů (krystalů LiF s barevnými centry  $F^{2-}$ ).

### 2 Postup a výsledky

Úloha byla sestavena dle schématu na Obr. 1. Ihned po příchodu k úloze jsme si zaznamenali parametry laseru Nanolase NP-02012-100 uvedené v technické dokumentaci vedle úlohy. Laser byl diodově čerpaný, mikročipový s aktivním prostředím Nd:YAG (tzn. vlnovou délkou  $\lambda = 1064\text{ nm}$ ). Laser samotný byl pasivně Q-spínaný prostřednictvím saturovatelného absorbérů Cr:YAG. Jeho další parametry jsou uvedeny v Tab. 1. Schéma uspořádání rezonátoru tohoto laseru je zakresleno na Obr. 2.



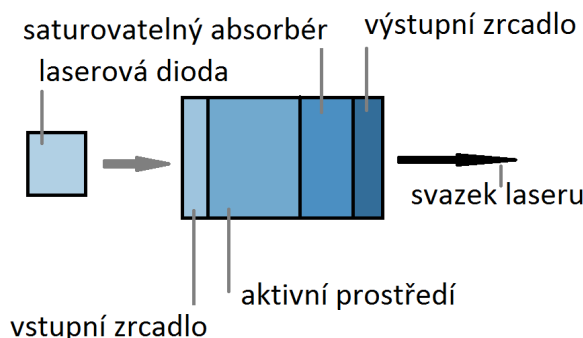
Obrázek 1: Principiální schéma uspořádání měření, převzato z [1].

Za předpokladu, že svazek vycházející z tohoto laseru je opravdu  $TEM_{00}$ , má Gaussovský profil. Budou pro něj potom platit dva důležité vztahy

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}, \quad (1)$$

$$b = 2 \cdot z_0 = 2 \cdot \frac{\pi w_0^2}{\lambda}, \quad (2)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka,  $w_0$  poloměr svazku v krčku,  $w$  poloměr svazku,  $z_0$  je Rayleighova vzdálenost,  $b$  konfokální parametr a  $z$  poloha na ose svazku vůči poloze krčku.



Obrázek 2: Schéma uspořádání rezonátoru mikročipového laseru Nanolase dle technické dokumentace u úlohy.

Chceme-li určit špičkovou hustotu výkonu laseru  $p$  v daném bodě, stačí nám vydělit výkon odpovídající plochou. V našem případě tedy

$$p = \frac{P_p}{\pi \cdot w^2}, \quad (3)$$

kde  $P_p$  je špičkový výkon impulsu a  $\pi \cdot w^2$  plocha svazku v daném bodě. Nesmíme přitom zapomenout, že  $w$  je funkcí polohy  $z$ , tudíž za  $w$  musíme dosadit ze vztahu (1).

## 2.1 Ověřování parametrů laseru

V první řadě jsme měli za úkol ověřit hodnoty jednotlivých parametrů uvedené v technické dokumentaci laseru. Začali jsme měřením středního výkonu  $P_{str}$ , k čemuž jsme využili wattmetru a po jeho vynulování na daném rozsahu jsme zaznamenali naměřenou hodnotu. Dále jsme měřili fotodiodou zapojenou do osciloskopu, který jsme nastavili tak, abychom mohli odečíst periodu opakování pulsů laseru. Tu jsme určili jako  $\tau_1 = 70 \mu s$  a ze vztahu  $f = 1/\tau_1$  jsme určili frekvenci pulsů laseru  $f$ . Jako poslední změřenou hodnotu jsme po vhodném přenastavení osciloskopu (viz Diskuse) získali délku trvání jednoho pulsu  $\tau_p = 1,5 \text{ ns}$  jako FWHM píku pozorovaného na osciloskopu. Po níže probírané diskusi s asistentem jsme ale další výpočty prováděli s tabulkovou hodnotou  $\tau_p = 0,81 \text{ ns}$ . Z těchto hodnot jsme podle vztahů

$$E_p = \frac{P_{str}}{f}$$

a

$$P_p = \frac{E_p}{\tau_p}$$

určili také energii jednoho impulsu  $E_p$  a špičkový výkon jednoho impulsu  $P_p$ . Všechny naměřené i vypočítané hodnoty z této části měření jsou uvedeny v Tab. 1.

## 2.2 Měření nelineární transmise krystalu $\text{LiF} : \text{F}^{2-}$

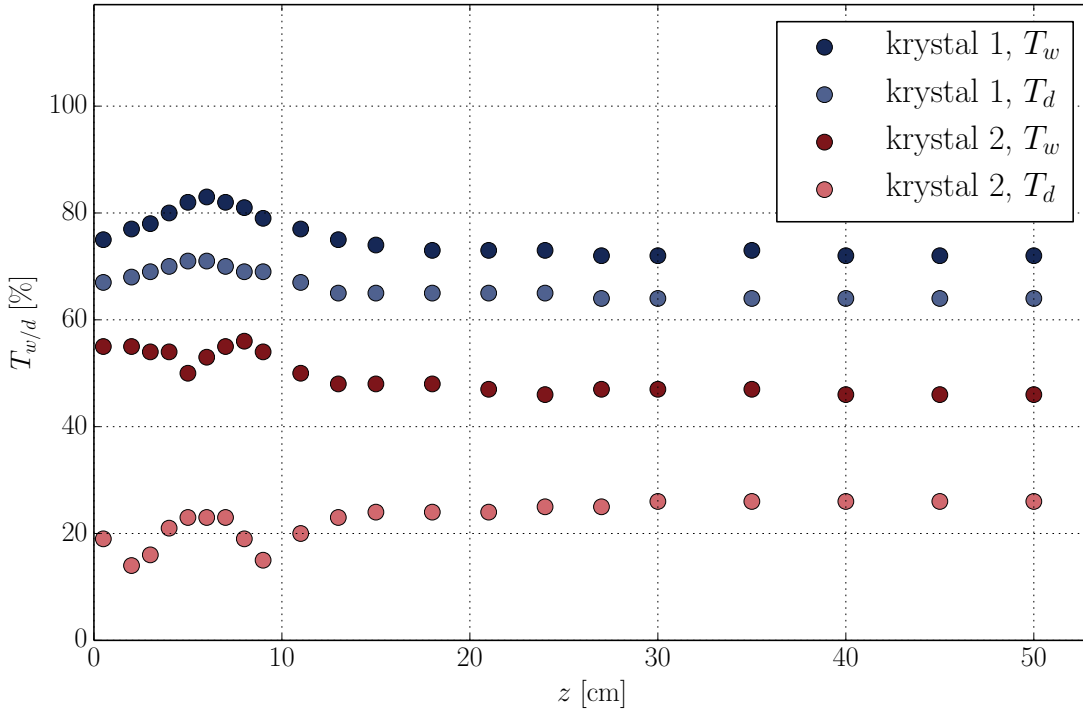
Na posuvný stůl jsme umístili daný krystal a nastavili jeho polohu tak, aby laser svítil co nejpřesněji do středu hladké stěny krystalu a co možná nejkolměji na ni. Poté jsme s krystalem pohybovali podél optické osy a měřili pomocí wattmetru či fotodiody výkon procházejícího záření, respektive jemu odpovídající napětí. Poté jsme krystal ze stojánku odebrali a změřili jsme hodnotu výkonu  $P_{max}$  resp. napětí  $U_{max}$  bez průchodu svazku saturovatelným absorpčním prvkem. Tyto hodnoty jsme určili jako  $P_{max} = 100 \text{ mW}$  a  $U_{max} = 1 \text{ V}$ .

	měření	specifikace
$P_{str}$ [mW]	35,0	44,2
$f$ [kHz]	14,29	15,26
$\tau_p$ [ns]	0,81*	0,81
$E_p$ [ $\mu$ J]	2,45	2,90
$P_p$ [kW]	3,02	3,58

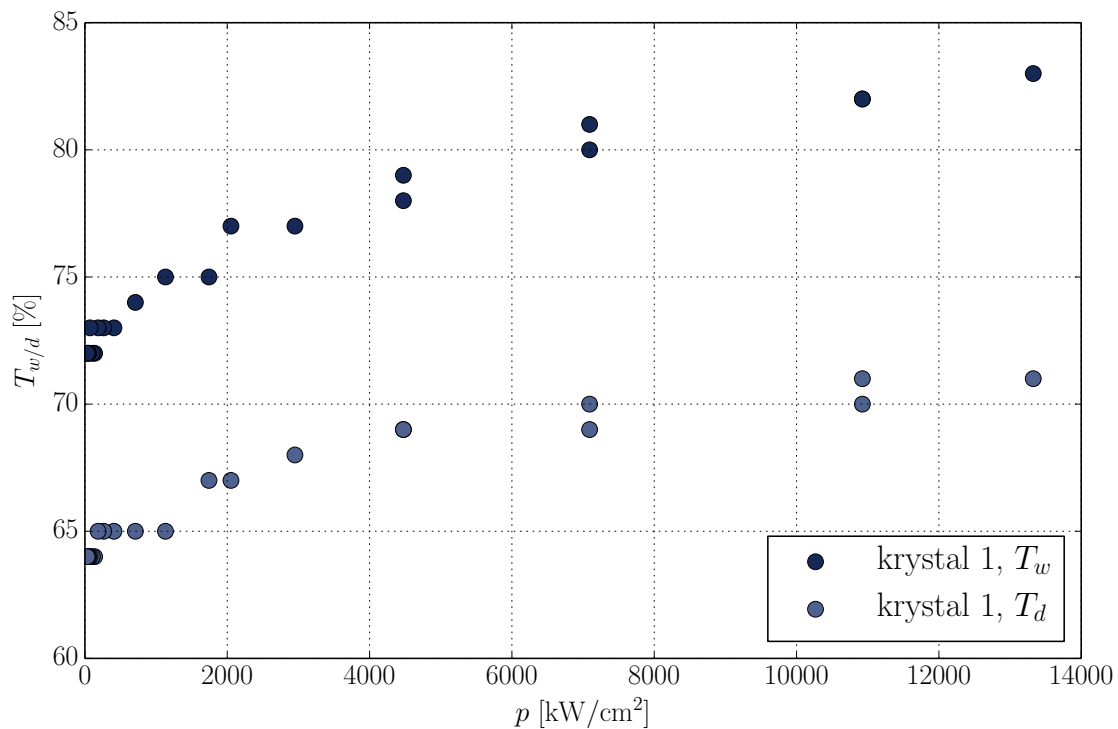
Tabulka 1: Naměřené a vypočítané hodnoty - porovnání reálných hodnot s teoretickými;  $P_{str}$  je střední výkon laseru,  $f$  frekvence pulsů laseru,  $\tau_p$  jejich délka,  $E_p$  energie jednoho impulsu a  $P_p$  jeho špičkový výkon. Hvězdičkou označená hodnota je diskutována níže.

Takto jsme změřili závislost transmise vzorku na zvětšující se vzdálenosti od výstupní apertury laseru do vzdálenosti 50 cm. S oběma detektory jsme měření prováděli hustěji v okolí krčku (oblasti velkých změn). Umístění krčku jsme stanovili podle největších hodnot výkonu jako přibližně  $z_k = 6$  cm. Podle technické dokumentace laseru by se krček svazku měl nacházet přibližně 25 mm od výstupní apertury laseru a měl by mít poloměr  $85 \mu\text{m}$ . Za předpokladu poloměru svazku v krčku  $w_0 = 85 \mu\text{m}$  a vlnové délky laseru  $\lambda = 1064$  nm můžeme pomocí vzorce (2) určit Rayleighovu vzdálenost jako  $z_0 = 2,1$  cm a konfokální parametr jako  $b = 4,3$  cm.

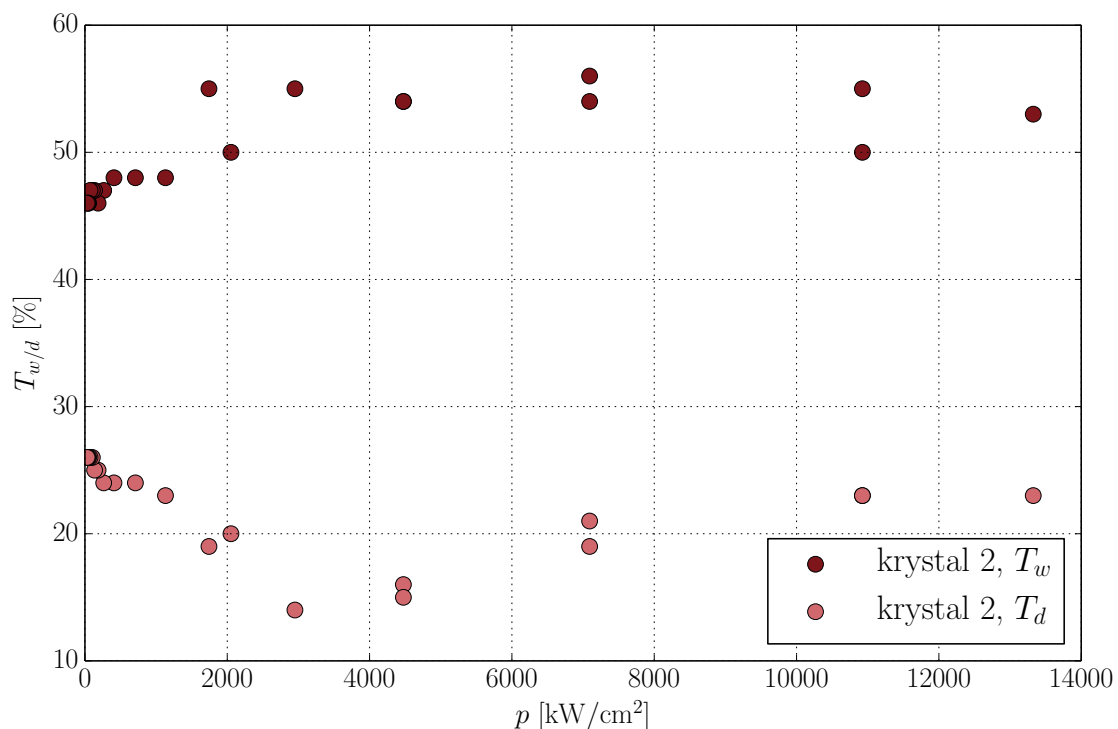
Hustotu výkonu laserového záření v jednotlivých místech na optické dráze jsme určili ze vztahu (3), hodnoty transmise pak jako podíl  $P$  či  $U$  naměřených v daném bodě ku  $P_{max}$  resp.  $U_{max}$ . Námi naměřené a z nich tímto způsobem vypočítané hodnoty jsou vyneseny v Tab. 3 a 4 a v grafech na Obr. 3, 4 a 5. Tab. 2 udává hodnoty poloměru svazku a hustoty výkonu dopadajícího na vzorek v různých vzdálenostech podle našich výpočtů. Saturační intenzitu bychom z grafů na Obr. 4 a 5 mohli určit jako  $I_{s1} = 4 \text{ MW/cm}^2$  pro kratší a  $I_{s2} = 2 \text{ MW/cm}^2$ .



Obrázek 3: Vypočítané hodnoty; graf závislosti transmise  $T_{w/d}$  obou krystalů v závislosti na poloze saturovatelného absorbéru  $z$ . Indexy  $w$  a  $d$  značí transmissi měřenou wattmetrem respektive fotodiodou.



Obrázek 4: Vypočítané hodnoty; graf závislosti transmise  $T_{w/d}$  prvního (kratšího) krystalu v závislosti na špičkové hustotě výkonu  $p$ . Indexy  $w$  a  $d$  značí transmisi měřenou wattmetrem respektive fotodiodou.



Obrázek 5: Vypočítané hodnoty; graf závislosti transmise  $T_{w/d}$  druhého (delšího) krystalu v závislosti na špičkové hustotě výkonu  $p$ . Indexy  $w$  a  $d$  značí transmisi měřenou wattmetrem respektive fotodiodou.

$z$ [cm]	$w$ [ $\mu\text{m}$ ]	$p$ [kW/cm <sup>2</sup> ]
2,1	177	3069
6,0	85	13326
10,0	181	2951
50,0	1755	31

Tabulka 2: Hodnoty poloměru  $w$  a hustoty výkonu  $p$  svazku dopadajícího na vzorek v krčku ( $z = 6$  cm), ve vzdálenosti  $z = z_0 = 2,1$  cm a ve vzdálenostech  $z = 10$  cm a 50 cm.

### 3 Diskuse a závěr

Hned v první řadě bylo třeba přepnout v osciloskopu na jiný odpor, jelikož po prvním zapojení osciloskopu měly pulsy tvar s rychlým náběhem a následným pomalým útlumem, který trval celý čas do dalšího pulsu. Fakt, že došlo k prodloužení sestupné hrany připisujeme době vybíjení parazitní kapacity. Takové zapojení sice stačilo na určení frekvence pulsů laseru, ale na změření FWHM píku jednoho z pulsů ne. Proto jsme museli na osciloskopu přepnout z  $1\text{M}\Omega$  odporu na  $50\Omega$  odpor. To vedlo k rychlejšímu vybíjení parazitní kapacity a tím pádem ke zúžení pozorovaného píku. Tímto krokem jsme zpoždění způsobené osciloskopem změnili z desítek mikrosekund na méně než jednu nanosekundu, což už stačilo na měření, která dále diskutujeme. Takto krátkého zpoždění bychom nemohli dosáhnout, pokud by osciloskop měl nižší frekvenci než udávaných  $f_{3dB} = 450$  MHz.

Námi určené hodnoty parametrů laseru většinou odpovídají těm uvedeným v technické dokumentaci. Jedinou výraznou výjimkou je délka pulsů laseru  $\tau_p$ , kterou jsme při měření odečetli z osciloskopu jako 1,5 ns na rozdíl od 0,81 ns uvedených v dokumentaci. Tato odchylka nejspíš nebyla způsobena naší chybou, ale zpožděním, které do systému zanesla aparatura. Předpokládáme, že šíření vzduchem nijak neovlivňovalo šířku píku jednoho pulsu, ale fotodiody už způsobovat zpoždění mohla. Budeme-li předpokládat 1 ns dobu odezvy fotodiody  $\tau_{pd}$  (zjištěnou od asistenta úlohy) a dobu náběhu osciloskopu  $\tau_{osc} = 0,7$  ns, získáme podle následujícího vzorce hodnotu zpoždění systému  $\tau_{system}$  jako

$$\tau_{system} = \sqrt{\tau_{osc}^2 + \tau_{pd}^2} = \sqrt{0,7^2 + 1^2} \cong 1,2 \text{ ns.}$$

Budeme-li dále předpokládat, že doba jednoho pulsu laseru je právě  $\tau_p = 0,81$  ns, bude pro námi změřenou hodnotu  $\tau_{změř}$  platit

$$\tau_{změř} = \sqrt{\tau_{system}^2 + \tau_p^2} = \sqrt{1,2^2 + 0,81^2} \cong 1,5 \text{ ns,}$$

což dobře odpovídá námi změřené hodnotě. Z tohoto důvodu považujeme hodnotu  $\tau_p$  uvedenou v Tab. 1 za správnou a dále počítáme s ní.

Měření transmise dvou krystalů o různých délkách se nám podařilo úspěšně provést. Vzhledem k hodnotě transmise jsme toho názoru, že k saturaci vzorků došlo. Je zřetelné, že jsou pozorované změny transmise v závislosti na vzdálenosti relativně malé, což jsme očekávali. Zajímavostí je, že při měření delšího krystalu se mírně posunula poloha, ve které jsme pozorovali maximum transmise. Předpokládáme, že byl tento jev spojen s větší délkou krystalu, jelikož byly oba krystaly podle dokumentace ze stejného materiálu a tudíž se nelišily indexem lomu. Jednou z možností je mírná nehomogenita delšího krystalu, která se mohla projevit posunutím pozice s maximální transmisí. Další možností je, že ač dochází k dostatečné saturaci na začátku krystalu ve vzdálenosti krčku, na jeho konci už tomu tak není a transmise je proto nižší. Nejvyšší transmisí v takovém případě naměříme dále, ve chvíli kdy dojde k dostatečné saturaci v celém krystalu.

Odlišnosti v naměřených datech pro jednotlivé metody a jednotlivé krystaly přisuzujeme několika faktorům. Za prvé jsme byli nuceni wattmetr vynulovat a je možné, že to vneslo do

všech hodnot jím změřených systematickou chybu. Za druhé jsme nejprve měřili transmissi pro oba vzorky wattmetrem a poté opět pro oba vzorky fotodiodou. Měření by se zpřesnilo, pokud bychom nejprve změřili jeden vzorek na stejném místě oběma metodami a teprve poté vzorky vyměnili. To by bylo lepší, jelikož bychom vzorky oběma metodami měřili v přesně stejné poloze. Při měření fotodiodou, tedy při druhém umístění každého z krystalů, jsme tím pádem evidentně naměřili jiné hodnoty. Druhé umístění také pravděpodobně nebylo tak přesné jako první a nárůst transmise při vzdálenostech od 20 cm dál si vysvětlujeme tím, že laser svítil i kolem krystalů. Další rozdíly jednotlivých metod mohly do měření vnést dlouhé přestávky v důsledku vysvětlování látky. U této úlohy velice oceňujeme podnětnou diskusi a vysvětlení jak práce s osciloskopem tak principů jeho fungování.

## Reference

- [1] *Návod k úloze 6 - Nelineární transmise satureovatelných absorbérů* [online], [cit. 25. března 2015], <http://people.fjfi.cvut.cz/blazejos/public/ul6.pdf>

## Přílohy

$z$ [cm]	$p$ [kW/cm <sup>2</sup> ]	$P$ [mW]	$U$ [V]	$T_w$ [%]	$T_d$ [%]
0,5	1743	19,8	0,19	55	19
2,0	2951	19,8	0,14	55	14
3,0	4475	19,5	0,16	54	16
4,0	7092	19,5	0,21	54	21
5,0	10925	18,0	0,23	50	23
6,0	13326	18,9	0,23	53	23
7,0	10925	19,8	0,23	55	23
8,0	7092	20,1	0,19	56	19
9,0	4475	19,5	0,15	54	15
11,0	2052	18,0	0,20	50	20
13,0	1132	17,4	0,23	48	23
15,0	709	17,4	0,24	48	24
18,0	408	17,1	0,24	48	24
21,0	264	16,8	0,24	47	24
24,0	185	16,5	0,25	46	25
27,0	136	16,8	0,25	47	25
30,0	104	16,8	0,26	47	26
35,0	72	16,8	0,26	47	26
40,0	52	16,5	0,26	46	26
45,0	40	16,5	0,26	46	26
50,0	31	16,5	0,26	46	26

Tabulka 3: Naměřené a vypočítané hodnoty při měření nelineární transmise prvního (kratšího) krystalu;  $z$  je poloha na optické lavici,  $p$  hustota špičkového výkonu laseru v dané poloze,  $P$  wattmetrem naměřený výkon,  $U$  fotodiodou a osciloskopem naměřené napětí,  $T_w$  a  $T_d$  hodnoty transmise vypočítané z měření wattmetrem a fotodiodou.

$z$ [cm]	$p$ [kW/cm <sup>2</sup> ]	$P$ [mW]	$U$ [V]	$T_w$ [-]	$T_d$ [-]
0,5	12632	19,8	0,19	55	19
2,0	7092	19,8	0,14	55	14
3,0	4475	19,5	0,16	54	16
4,0	2951	19,5	0,21	54	21
5,0	2052	18,0	0,23	50	23
6,0	1495	18,9	0,23	53	23
7,0	1132	19,8	0,23	55	23
8,0	885	20,1	0,19	56	19
9,0	709	19,5	0,15	54	15
11,0	483	18,0	0,20	50	20
13,0	349	17,4	0,23	48	23
15,0	264	17,4	0,24	48	24
18,0	185	17,1	0,24	48	24
21,0	136	16,8	0,24	47	24
24,0	104	16,5	0,25	46	25
27,0	83	16,8	0,25	47	25
30,0	67	16,8	0,26	47	26
35,0	49	16,8	0,26	47	26
40,0	38	16,5	0,26	46	26
45,0	30	16,5	0,26	46	26
50,0	24	16,5	0,26	46	26

Tabulka 4: Naměřené a vypočítané hodnoty při měření nelineární transmise druhého (delšího) krystalu;  $z$  je poloha na optické lavici,  $p$  hustota špičkového výkonu laseru v dané poloze,  $P$  wattmetrem naměřený výkon,  $U$  fotodiodou a osciloskopem naměřené napětí,  $T_w$  a  $T_d$  hodnoty transmise vypočítané z měření wattmetrem a fotodiodou.