

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

## PRAKTIKUM ...

Úloha č. ....

Název: .....

Pracoval: ..... stud. skup. .... dne .....

Odevzdal dne: .....

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 – 5	
Teoretická část	0 – 1	
Výsledky měření	0 – 8	
Diskuse výsledků	0 – 4	
Závěr	0 – 1	
Seznam použité literatury	0 – 1	
<b>Celkem</b>	max. 20	

Posuzoval: ..... dne .....

# Pracovní úkoly

1. Navažte laserový svazek do vlákna a seřídte jednotlivé moduly tak, abyste dosáhli maximálního výkonu na výstupu z vlákna.
2. Změřte numerickou aperturu vlákna, zpracujte graficky.
3. Změřte dobu průchodu světla vláknem, určete rychlost světla ve vlákně.
4. Určete relativní výstupní výkon laserové diody v závislosti na napájecím proudu, zpracujte graficky.

## 1 Teoretická část

### 1.1 Optické vlákno a jeho numerická apertura

Optická vlákna používaná jako vlnovody jsou tvořena sklěným jádrem o indexu lomu  $n_k$ , které je obklopeno pláštěm s nepatrně menším indexem lomu  $n_m$ . Ideálně předpokládáme, že oba indexy se rozprostírají ve vlákně homogenně. Aby se paprsek světla šířil vláknem, musí docházet k úplnému odrazu na rozhraní jádra a pláště. To nastává, pokud úhel dopadu na rozhraní  $\alpha$  je minimálně kritický úhel  $\alpha_c$ , pro který platí

$$\sin \alpha_c = \frac{n_m}{n_k}, \quad (1)$$

tedy pro mezní úhel  $\varphi_c$  mezi směrem šíření paprsku a optickou osou vlákna ( $\sin \alpha = \cos \varphi$ )

$$\sin \varphi_c = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_c} = \sqrt{1 - \frac{n_m^2}{n_k^2}}. \quad (2)$$

Paprsek vstupuje do vlákna pod úhlem  $\varphi_e$  z prostředí s indexem lomu  $n_0$ . Pomocí známého Snellova zákona lze s ním tedy svázat  $\varphi$  jako

$$\frac{\sin \varphi_e}{\sin \varphi} = \frac{n_k}{n_0}. \quad (3)$$

V případě, že vnějším prostředím je vzduch ( $n_0 \approx 1$ ) a hledáme maximální úhel  $\varphi_{ec}$  pro následující úplný odraz, z (1), (2) a (3) máme

$$\varphi_{ec} = \arcsin \left( \sqrt{n_k^2 - n_m^2} \right). \quad (4)$$

Úhel  $\varphi_{ec}$  představuje polovinu vrcholového úhlu vstupního kužele vlákna. Všechny paprsky z tohoto kužele se dále šíří díky totálnímu odrazu vláknem. Numerickou aperturu  $A$  pak obvykle definujeme

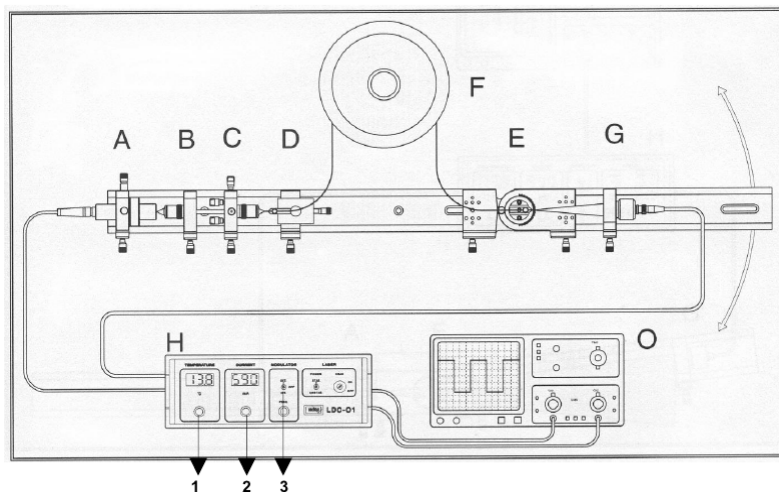
$$A = \sin \varphi_{ec} = \sqrt{n_k^2 - n_m^2}. \quad (5)$$

Při experimentálním zjišťování numerické aperuty proměříme závislost výstupního výkonu vlákna na směru  $\varphi$ . Předpokládáme rychlý pokles intenzity na obě strany od maxima v přímém směru ( $\varphi = 0^\circ$ ). Najdeme úhly, pro které klesne snímaný signál na  $1/e^2$  maximální hodnoty, a určíme tak numerickou aperturu vlákna.

### 1.2 Schéma experimentu, navázání svazku do vlákna

Schéma experimentu je znázorněno na obr. 1, popis jednotlivých modulů:

- A** Laserová dioda, kterou lze jemně posouvat v rovině  $xy$ , maximální výkon 50 mW, vlnová délka světla 815 nm.
- B** Mikroskopový objektiv, fokusuje svazek diody.
- C** Podobný jako B, umožňuje však jemné nastavení v rovině  $xy$ . Dovoluje nastavit objektiv o menší ohniskové délce, aby vhodně soustředil svazek diody a zajistil navázání do vlákna.
- D** Držák vlákna, jemně posunovatelný ve směru záření.
- E** Držák druhého konce vlákna, připojen kloubem k nastavení výstupního úhlu, nelze posouvat lineárně.
- F** Cívka s vláknem.
- G** Detektor, PIN fotodiody.
- H** Řídící jednotka. Napájí diodu proudem, stabilizuje a měří teplotu laserové diody, zesiluje signál detekční diody.
- O** Dvoukanálový 100 MHz osciloskop.



Obr. 1: Schéma experimentálního uspořádání.

Před začátkem měření nejprve identifikujeme optickou osu pomocí posunů v  $xy$ , to se projeví maximem signálu pozorovaného na osciloskopu (vstupní proud je modulován tak, aby vytvářel téměř pravoúhlé pulsy). Dbáme na to, aby detektor nedosáhl saturace. Následuje navázání modulu **C** do vzdálenosti cca 50 mm od **B**. Do modulu **D** opatrně upevníme pomocí magnetky vlákno a položíme zhruba do míst, kde je svazek diody fokusován. Jemným posuvem modulu **D** a modulu **C** v rovině  $xy$  se snažíme docílit maximální amplitudy osciloskopu. Detailní postup viz. [2].

### 1.3 Rychlost světla

Připojením signálu laserové diody na druhý kanál osciloskopu můžeme jej na displeji porovnat se signálem z detektoru (obr. 2). Křivky A, B a C odpovídají postupně signálům z diody, z detektoru bez průchodu vláknem a po průběhu vláknem. Jejich vzájemná vzdálenost v polovině náběžných hran stanovuje časové zpoždění signálu. Měřením bez a poté se zapojeným vláknem můžeme určit obě zpoždění  $T_1$  (bez) a  $T_2$  (s). Rozdíl  $T_2$  a  $T_1$  je čas, který je potřeba k průchodu vláknem

$$\tau = (T_2 - T_1), \quad (6)$$

ze kterého mohu při znalosti délky vlákna  $L$  určit rychlost světla ve vlákne  $V$  jako

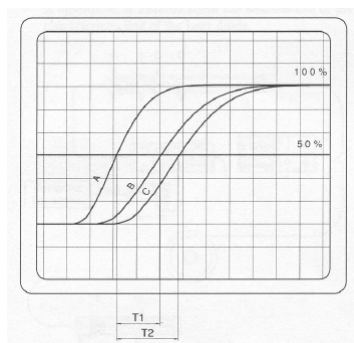
$$V = L/\tau. \quad (7)$$

Teoretickou hodnotu rychlosti lze spočítat z teoretické doby průchodu

$$\tau_{teor} = L \frac{n_{eff}}{c}, \quad (8)$$

kde  $n_{eff}$  je efektivní hodnota indexu lomu vlákna a  $c$  rychlost světla ve vakuu (vzduchu).

$$V_{teor} = L/\tau_{teor}. \quad (9)$$



Obr. 2: Časové závislosti signálů na obrazovce osciloskopu.

## 2 Výsledky měření

### 2.1 Zpracování

Není-li uvedeno jinak, chyby nepřímě měřených veličin ( $f$ ) počítám podle [3]:

$$\sigma_{f(x_i)} = \sqrt{\sum_i \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}. \quad (10)$$

### 2.2 Navázání svazku do vlákna, parametry vlákna

Nejprve byl svazek z laserové diody navázán do vlákna, což probíhalo podle výše uvedeného postupu (viz. část 1.2). Délka vlákna je asi 100 m [2]. Odchylku od této hodnoty odhaduji na 1 m (vlákno se občas zastříhuje při poškození apod., raději nadhodnocuji, neboť jsem tento údaj nijak konkrétně neověřoval),  $L = (100 \pm 1)$  m. Index lomu jádra  $n_k = 1.465$ , obalu  $n_m = 1.462$ . Maximální emitovaný výkon diody 50 mW, vlnová délka světla 815 nm. Proud procházející diodou nastaven na maximální hodnotu cca 100-102 mA, modulován tak, že na osciloskopu se zobrazují téměř pravouhlé pulsy.

### 2.3 Numerická apertura

Pro určení numerické apertury vlákna  $A$  lze vlákno upevnit do modulu **E** s kloubem, jenž umožňuje natáčení detektoru vůči zbytku aparatury. Pomocí kurzorů osciloskopu určuji výstupní napětí  $U$ , které je přímo úměrné intenzitě signálu, v závislosti na úhlu  $\varphi$  natočení fotodiody. Chybu  $U$  odhaduji asi 3 %, min. však 0.02 mV, úhlu  $\varphi$  pak na  $1^\circ$  (nejmenší dílek  $2^\circ$ ). Data v tabulce 1, závislost normované intenzity na  $\varphi$  vynesena v grafu na obr. 3 a proložena Gaussovou funkcí tvaru  $y = a\sqrt{\frac{2}{\pi w^2}} \exp\left(-2\left(\frac{\varphi - \varphi_0}{w}\right)^2\right) + y_0$  s výslednými koeficienty

$$\begin{aligned} a &= (7.4 \pm 0.3), \\ \varphi_0 &= (-0.06 \pm 0.07)^\circ, \\ w &= (5.87 \pm 0.21)^\circ, \\ y_0 &= (-0.01 \pm 0.02). \end{aligned}$$

Stanovením úhlu  $\varphi_{ec}$ , pro který  $y = 1/e^2$  (vyznačeno na obr. 3), lze určit numerickou aperturu vlákna (5)

$$A = (0.10 \pm 0.02).$$

Teoretická hodnota dle (5), při známém  $n_k$  a  $n_m$

$$A_{teor} = 0.094.$$

$\varphi$ [ $^\circ$ ]	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
$U$ [mV]	0	0	0.36	0.95	2.00	2.36	2.03	0.86	0.21	0	0

Tabulka 1: Naměřené výstupní napětí  $U$  při natočení ramena o úhel  $\varphi$ .

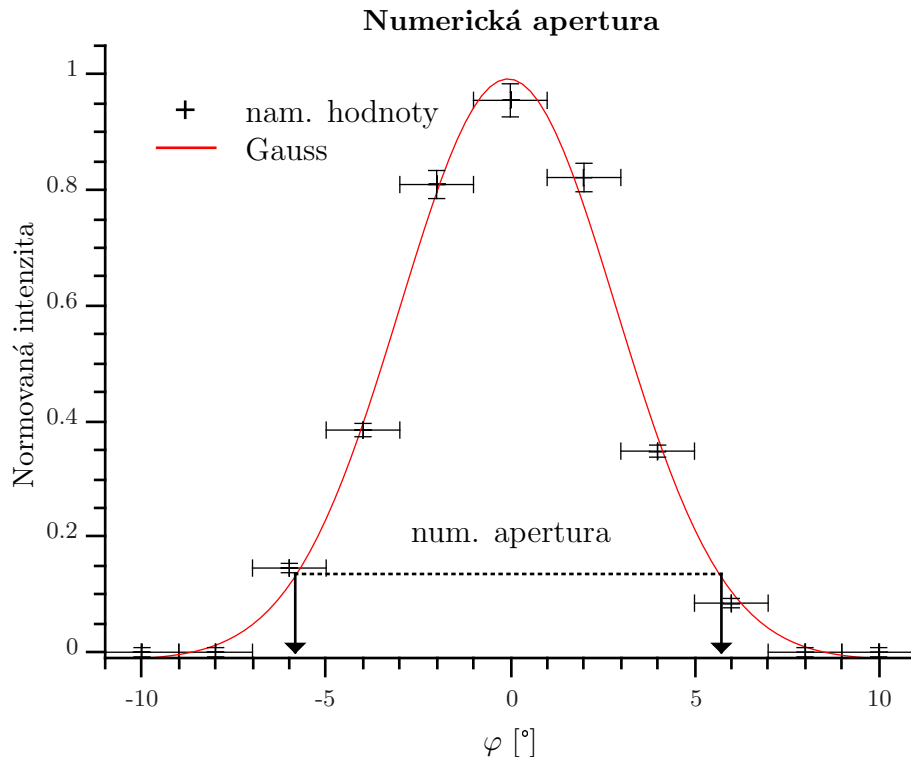
### 2.4 Rychlost světla vláknem

Na druhý kanál osciloskopu připojím signál z laserové diody (k zmenšení signálu přidáme odporový bočník). Opět použitím kurzorů osciloskopu změřím nejprve časovou vzdálenost  $T_2$  křivek (obr. 2) po průchodu světla vláknem. Odstraněním vlákna zjistím i  $T_1$ . Chybu časů odhaduji na  $0.5 \mu\text{s}$  podle šířky křivek na displeji a použitého rozlišení osciloskopu. Spočtu dobu  $\tau = T_2 - T_1$  potřebnou k průchodu vláknem a ze znalosti délky vlákna  $L$  podle (7) spočtu rychlost světla ve vlákně

$$V = (1.72 \pm 0.30) \times 10^8 \text{ m/s.}$$

Podobně při  $n_{eff} = 1.46$  [2] z (8) a (9) mohu tuto rychlost teoreticky odhadnout jako

$$V_{teor} = 2.00 \times 10^8 \text{ m/s.}$$



Obr. 3: Závislost normované intezity signálu na úhlu natočení ramena detektoru  $\varphi$ .

## 2.5 Výstupní výkon laserové diody

Nakonec z aparatury odstraníme vlákno a před laserovou diodu umístíme přímo PIN fotodiodu (detektor). Kontrolní jednotkou **H** měníme vstupní proud  $I$ , v závislosti na němž měříme výstupní napětí  $U$  přímo úměrné výkonu. Data se nachází v tabulce 2 a 3, závislost je vynesena v grafu na obr. 4 a 5. Chybu nastaveného proudu  $I$  odhaduji na 1 mA, chybu napětí  $U$  cca 3 %. Protože z měření v libovolné vzdálenosti diody od detektoru, kterou aparatura umožňuje, se zdálo, že detekční fotodioda je saturována, bylo nutné do uspořádání přidat ještě světelný filtr. Závislost na obr. 5 odpovídá vzdálenosti laserové diody od detektoru asi 1 m, pro obr. 2 (tab. 2) stál před detektorem ještě dodatečný světelný filtr. Obě závislosti jsou proloženy polynomiální fci vyššího stupně (na příslušném oboru) namísto předpokládané lineární.

$I$ [mA]	20	33	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$U$ [mV]	0.00	1.32	2.94	6.20	9.68	12.8	45.0	17.7	20.4	23.0	25.3	27.0	29.5	31.5	33.7	35.6

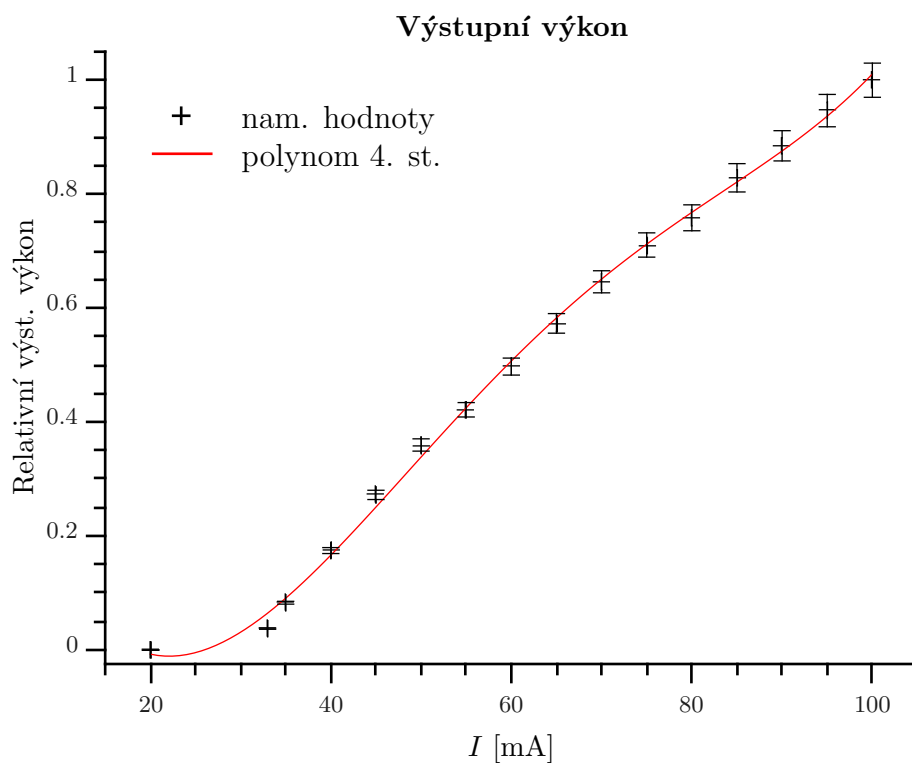
Tabulka 2: Vstupní proud  $I$  a výstupní napětí  $U$  při vzdálenosti detektoru cca 1 m od laserové diody a navíc předřazeném světelném filtru.

$I$ [mA]	20	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
$U$ [mV]	0.00	2.10	13.3	26.2	53.6	86.2	145	183	202	212	222

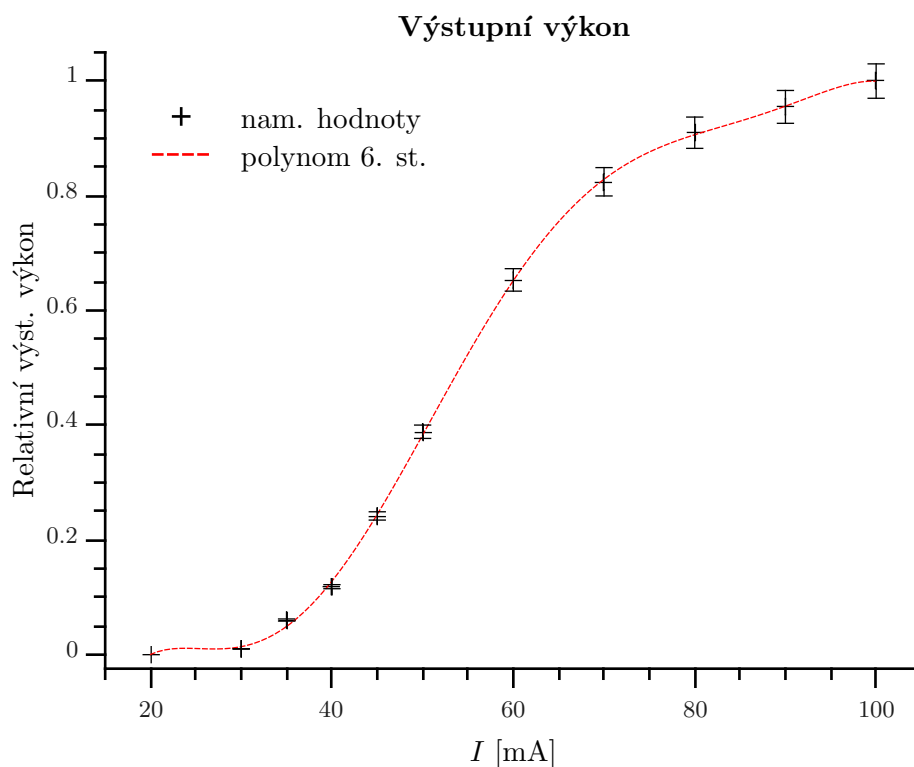
Tabulka 3: Vstupní proud  $I$  a výstupní napětí  $U$  při vzdálenosti detektoru cca 1 m od laserové diody.

## 3 Diskuse výsledků

Paradoxně nejobtížnější bylo navázat svazek do vlákna. Vedle možných komplikací, jako např. poškození vlákna, je vhodné skutečně najít polohu, ve které je výstupní intenzita co největší. To se bohužel ne vždy povede, ať už vinou manipulace s vlákem nebo jemného a velice citlivého nastavení aparatury.



Obr. 4: Závislost relativního výstupního výkonu laserové diody v závislosti na vstupním proudu  $I$  s předřazeným světelným filtrem.



Obr. 5: Závislost relativního výstupního výkonu laserové diody v závislosti na vstupním proudu  $I$ .

Vedle přímých zdrojů chyb je možno zařadit ještě odraz světla od lesklých částí aparatury, hlavně od držáku u výstupu z vlákna. Řešením je povysunout vlákno více ven z drážky směrem k detektoru. To však při měření apertury zvyšuje chybu směrového úhlu  $\varphi$ . Detektor navíc nezachycuje pouze světlo vystupující z vlákna, ale i zbytek svazku, který nebyl přímo navázán. Lze jej odstínit použitím jakéhokoli tmavého předmětu.

Největší podíl na chybě numerické apertury vlákna se skrývá ve stanovení úhlu  $\varphi$ , systematická chyba způsobená posunutím vlákna (viz. výše) a samotná chyba měřidla a odečítání z jeho stupnice (poměrně drobná stupnice s velkým intervalem nejmenšího dílku  $2^\circ$ ). Změřená numerická apertura  $A$  nijak zásadně neodporuje teoreticky stanovené  $A_{teor}$ , v rámci chyby se shodují.

Na nejistotě stanovení časových intervalů k určení rychlosti světla vláknem se nejvíce podepsala šířka čar sledovaného signálu na displeji osciloskopu spojená s jeho malou intenzitou. Také není zcela jasné nakolik je udávaná délka vlákna  $L$  přesná. S občasným zastřiháváním v důsledku poškození konců vlákna by se mohlo jednat až o desítky centimetrů. Nijak jsem tuto informaci blíže nezkoumal, proto jsem raději chybu  $L$  nadhodnotil na celý metr. Výsledná rychlost  $V$  se svým chybovým intervalem teoretickému odhadu  $V_{teor}$  odpovídá.

Nejvýraznější problém nastal při zkoumání závislosti výstupního výkonu laserové diody na vstupním proudu. Dle předpokladu byl nalezen prahový proud, po jehož dosažení stoupal výstupní výkon zhruba lineárně (okolo 40 mA). Ovšem záhy se závislost stočila zpět doprava a růst výkonu s navyšujícím se proudem poklesl, dokonce zůstal téměř konstantní, jako by fotodioda byla zcela saturována, a to pro libovolnou vzdálenost laserové diody od ní. Vše ilustruje jedno vybrané měření v tabulce 3 a grafu na obr. 5, příp. možno nahlédnout na některá data v příloženém záznamu (charakterem se však mnoho neliší). K získání závislosti alespoň připomínající lineární předpoklad jsme museli před fotodiodu postavit ještě světelný filtr, detaily viz. tab. 2 a graf na obr. 4. Z těchto důvodů samozřejmě nebyly změřené závislosti prokládány křivkami lineárních fcí, ale pokusil jsem se (spíše demonstrativně) nalézt vhodný polynom. Možnost, že snímací dioda byla poškozena, pak ale relativizuje výsledky získané ve zbylých měřeních.

## 4 Závěr

Do optického vlákna byl za použití aparatury z obr. 1 navázán svazek laserové diody.

Pomocí dvoukanálového osciloskopu byla proměřena závislost relativní výstupní intenzity z vlákna na směru, viz. tab. 1 a graf na obr. 3. Ze získaných dat nalezena numerická apertura vlákna

$$A = (0.10 \pm 0.02)$$

a teoreticky odhadnuta její hodnota ze znalosti indexů lomu jádra a pláště vlákna

$$A_{teor} = 0.094.$$

Určena byla rychlost světla ve vlákně a spočten její teoretický odhad

$$V = (1.72 \pm 0.30) \times 10^8 \text{ m/s.}$$
$$V_{teor} = 2.00 \times 10^8 \text{ m/s.}$$

V závislosti na vstupním proudu  $I$  byla zkoumána relativní velikost výstupního výkonu použité laserové diody, viz. tab. 2, 3 a grafy na obr. 4, 5.

Výsledky byly zpracovány a grafy sestrojeny pomocí programu *QtiPlot 0.9.8.4*.

## Reference

- [1] Laboratory Experiments: Fibre optics (studijní text: Vláknová optika), PHYWE, Göttingen, zapůjčeno v praktiku III
- [2] Pokyny k měření, praktikum III: Vláknová optika, <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/>
- [3] English J.: Zpracování výsledků fyzikálních měření, 1999, <http://physics.mff.cuni.cz/to.en/vyuka/zfp>