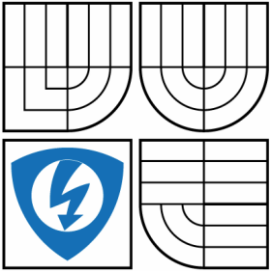


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MIKROOHYBOVÉ OPTOVLÁKNOVÉ SNÍMAČE

MICROBENDING FIBER OPTIC SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Švestka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Jiří Švestka

ID: 106829

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Mikroohybové optovláknové snímače

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Popište princip, základní vlastnosti a použití mikroohybových optovláknových snímačů.
- 2) Ověřte vliv makroohybů na používaném holém optickém vlákně. Ověřte závislost ztrát u holého optického vlákna při ohybu na válečcích s různými průměry a s ohybem vlákna o 180 stupňů.
- 3) Navrhněte a realizujte testovací přípravky, na kterých by bylo možné experimentálně odzkoušet vliv velikosti deformačních hrotů a hustotu deformačních hrotů mikroohybových destiček na velikost přenášeného signálu.
- 4) Ověřte použití mikroohybových optovláknových snímačů pro měření hmotnosti, síly a výšky hladiny v nádobě. Na základě provedených měření navrhněte zadání laboratorní úlohy použitelné v předmětu Optovláknové snímače (MOES).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] KROHN, D. A.: Fiber Optic Sensors, Fundamentals and Application. Third Edition, ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2000. ISBN 1-55617-714-3
- [2] BERTHOLD, J. W.: Historical Review of Microbend Fiber-Optic Sensors. Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 7, July 1995.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 20.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vlivu mikroohybů na přenášený signál u holého optického vlákna. Vliv mikroohybů na přenášený signál se v této práci zkoumal pomocí změny hmotnosti, síly a výšky hladiny v nádobě pomocí vytvořeného zkušebního přípravku. Z výsledků provedených experimentů se navrholo zadání laboratorní úlohy pro měření vlivu mikroohybů na přenášený signál do předmětu Optovláknové snímače (MOES).

Klíčová slova

Optická vlákna, útlum, mikroohybové optovláknové snímače, deformační hroty, hmotnost, síla, výška hladiny.

Abstract

This thesis deals with the influence microbending the transmitted signal at the bare optical fiber. Microbending influence on the transmitted signal is investigated in this work by changing the weight, power and water level in the tank by using this test fixture. The results of the experiments are proposed to enter the laboratory tasks to measure the impact microbending the transmitted signal in the subject line fiber-optic sensors (MOES).

Keywords

Optical fibers,attenuation, microbending fiber optic sensors, strain tips, weight, power, height levels.

Bibliografická citace:

ŠVESTKA, J. *Mikrohybové optovláknové snímače*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 56s. Vedoucí diplomové práce byla Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma mikroohybové optovláknové snímače jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **20. května 2013**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Soně Šedivé, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **20. května 2013**

.....
podpis autora

Obsah

Úvod.....	13
1 Teoretická část.....	14
1.1 Optická vlákna [5, 7, 8].....	14
1.1.1 Dělení optických vláken [5, 7, 8].....	14
1.2 Optické vláknové snímače [1, 3].....	16
1.2.1 Výhody optických vláknových senzorů [1, 3,6]	16
1.2.2 Požadavky na optické vláknové snímače [1, 3,6]	17
1.2.3 Dělení optických vláknových senzorů [1, 3].....	17
1.2.4 Amplitudové optické vláknové senzory [1, 3,6]	19
2 Měřicí přípravek a destičky	25
2.1 Přípravek	25
2.2 Měřicí destičky.....	25
2.2.1 Rozměry použitých destiček	27
3 Praktická Měření	28
3.1 Použité měřicí přístroje:	28
3.2 Experimentální měření pro stanovení optimálního vedení optického vlákna přes destičky.	29
3.3 Experimentální měření pro zkoumání vlivu průměru ohybu vlákna na přenášený výkon	32
3.4 Experimentální měření pro zkoumání paměti vlákna	33
3.5 Experimentální měření pro zkoumání vlivu velikosti zátěže na přenášený výkon-závaží	36
3.6 Experimentální měření pro zkoumání vlivu velikosti zátěže na přenášený výkon-siloměr	40
3.7 Experimentální měření pro zkoumání vlivu výšky hladiny v nádobě na přenášený výkon	45
4 Návrh laboratorní úlohy	49
4.1 Zadání:	49
4.2 Použité měřicí přístroje:	49
4.3 Schéma zapojení:	49
4.4 Rozměry použitých destiček	50
4.5 Teoretická část:	51
4.6 Postup měření:.....	52

5	Závěr.....	54
---	------------	----

Seznam obrázků

Obrázek 1: Optické vlákno[7].....	14
Obrázek 2: Geometrické uspořádání, profil lomu a typické paprsky: a) jednomódové vlákno, b) mnohomódové vlákno se skokovou změnou indexu lomu, c) mnohomódové vlákno s gradientní změnou indexu lomu [7]	15
Obrázek 3: Konstrukce optických vláknových senzorů a) vlastní, b) nevlastní optický senzor, c) nevlastní neoptický senzor [3]	17
Obrázek 4: Mikroohybový optický vláknový senzor a) ukázka přechodu vedeného světla mimo jádro vlákna b) princip práce mikroohybového optického vláknového senzoru [6].....	20
Obrázek 5: Optický vláknový senzor koncentrace oleje ve vodě [6].....	23
Obrázek 6: Optické vláknové senzory výšky hladiny kapaliny a) jednovláknový, b) s vláknem ve tvaru U, c) dvouvláknový s optickým hranolem [6].....	24
Obrázek 7: Vytvořený přípravek.....	25
Obrázek 8: Použité destičky 11/1 a 11/2.....	26
Obrázek 9: Použité dráty o průměru 0,5 mm a 0,8 mm	26
Obrázek 10: Zvětšený pohled na okraj a bok použitých destiček	27
Obrázek 11: a) Zdroj PROLITE 81(850-1300nm), b) Detektor PM20.....	28
Obrázek 12: Modré vlákno.....	29
Obrázek 13: Zkoumané vlákno	29
Obrázek 14: Použité závaží.....	29
Obrázek 15: Digitální měřič síly FG 5000	29
Obrázek 16: Schéma zapojení pro měření výkonu při rovném optickém vlákně, které je jednou vedené přes destičky.	29
Obrázek 17: Schéma zapojení pro měření výkonu při ohnutém optickém vlákně.....	30
Obrázek 18: Schéma zapojení pro měření výkonu při rovném optickém vlákně.	32
Obrázek 19: Schéma zapojení pro měření výkonu při rovném optickém vlákně.	49
Obrázek 20: Schéma zapojení pro měření výkonu při různém ohnutí optického vlákna.....	50
Obrázek 21: Schéma zapojení pro měření výkonu při ohnutém optickém vlákně.....	50
Obrázek 22: Zvětšený pohled na okraj a bok použitých destiček	50
Obrázek 23: Mikroohybový optický vláknový senzor a) ukázka přechodu vedeného světla mimo jádro vlákna b) princip práce mikroohybového optického vláknového senzoru [6].....	52

Seznam tabulek

Tabulka 1: Charakteristiky různých typů optických vláken [7]	15
Tabulka 2: Změřené hodnoty výkonu pro rovné optické vlákno	30
Tabulka 3: Změřené hodnoty výkonu pro ohlé optické vlákno	31
Tabulka 4: Změřené hodnoty výkonu pro rovné optické vlákno bez zatížení	32
Tabulka 5: Změřené hodnoty výkonu pro ohlé optické vlákno bez zatížení.....	33
Tabulka 6: Změřené časy paměti vlákna pro destičky 1 při různé velikosti síly působci na destičky	34
Tabulka 7: Změřené časy paměti vlákna pro destičky 2 při různé velikosti síly působci na destičky	34
Tabulka 8: Vypočítané průměrné hodnoty výkonů z Tabulky 14, 15, 16 pro různé hodnoty závaží (použité desky 1).....	36
Tabulka 9: Vypočítané průměrné hodnoty výkonů z Tabulky 17, 18, 19 pro různé hodnoty závaží (použité desky 2).....	37
Tabulka 10: Vypočítané průměrné hodnoty výkonů z Tabulky 20, 21, 22 pro různé zatížení pomocí siloměru (použité desky 1).....	41
Tabulka 11: Vypočítané průměrné hodnoty výkonů z Tabulky 23, 24, 25 pro různé zatížení pomocí siloměru (použité desky 2).....	42
Tabulka 12: Vypočítané průměrné hodnoty výkonů z Tabulky 26, 27, 28 pro různou výšku hladiny (použité desky 1).....	46
Tabulka 13: Vypočítané průměrné hodnoty výkonů z Tabulky 29, 30, 31 pro různou výšku hladiny (použité desky 2).....	46
Tabulka 14: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí závaží (desky 1 s drátem $d=0,1$ mm).....	58
Tabulka 15: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí závaží (desky 1 s drátem $d=0,5$ mm).....	58
Tabulka 16: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí závaží (desky 1 s drátem $d=0,8$ mm).....	59
Tabulka 17: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí závaží (desky 2 s drátem $d=0,1$ mm).....	59
Tabulka 18: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí závaží (desky 2 s drátem $d=0,5$ mm).....	60

Tabulka 19: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí závaží (desky 2 s drátem $d=0,8$ mm)	60
Tabulka 20: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí siloměru (desky 1 s drátem $d=0,1$ mm)	61
Tabulka 21: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí siloměru (desky 1 s drátem $d=0,5$ mm)	62
Tabulka 22: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí siloměru (desky 1 s drátem $d=0,8$ mm)	63
Tabulka 23: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí siloměru (desky 2 s drátem $d=0,1$ mm)	64
Tabulka 24: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí siloměru (desky 2 s drátem $d=0,5$ mm)	65
Tabulka 25: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí siloměru (desky 2 s drátem $d=0,8$ mm)	66
Tabulka 26: Změřené hodnoty výkonu pro různou výšku hladiny (desky 1 s drátem $d=0,1$ mm)	67
Tabulka 27: Změřené hodnoty výkonu pro různou výšku hladiny (desky 1 s drátem $d=0,5$ mm)	67
Tabulka 28: Změřené hodnoty výkonu pro různou výšku hladiny (desky 1 s drátem $d=0,8$ mm)	67
Tabulka 29: Změřené hodnoty výkonu pro různou výšku hladiny (desky 2 s drátem $d=0,1$ mm)	68
Tabulka 30: Změřené hodnoty výkonu pro různou výšku hladiny (desky 2 s drátem $d=0,5$ mm)	68
Tabulka 31: Změřené hodnoty výkonu pro různou výšku hladiny (desky 2 s drátem $d=0,8$ mm)	68

Seznam symbolů, veličin a zkratek

Θ_d	úhel dopadu	[°]
n	index lomu	[-]
R_c	kritický poloměr	[m]
λ	vlnová délka	[m]
Q	modulační index	[-]
T_f	přenos optického vlákna	[-]
p	působící tlak	[Pa]
x	vzdálenost	[m]
β	fázová konstanta šíření	[-]
A	perioda mikroohybů optického vlákna	[m]
m	číslo vidu	[-]
M	celkový počet vidů	[-]
a	poloměr jádra	[m]
α	konstanta sloužící k určení profilu indexu lomu jádra	[-]
ΔF	koeficient deformací optického vlákna při ohnutí	[-]
A_s	plocha průřezu	[m ²]
Y_s	Youngov modul	[Pa]
L_s	délka deformačních prvků	[m]
Δp	změna tlaku	[Pa]
α_s	koeficient teplotní roztažnosti deformačních prvků	[°C ⁻¹]
$\Delta \Theta$	změna teploty	[°C]
m_p	hmotnost deformační destičky	[kg]
Δa	změna zrychlení	[m/s ²]
ΔH	změna magnetického pole	[A/m]
ΔE	změna elektrického pole	[V/m]
d_{33}^H	magnetostrikční koeficient	[T]
d_{33}^E	piezoelektrická síla materiálu	[V/m]

ÚVOD

Optické vláknové snímače jsou v současné době již poměrně rozšířené. Prvotní impulz byl koncem 60 let, kdy byl jejich nástup hlavně ze začátku razantní, ale časem zažil i sestupnou tendenci. Nedošlo u nich tak velkému rozšíření, jak bylo předpokládáno. U řady měření jsou ale tyto snímače nezastupitelné.

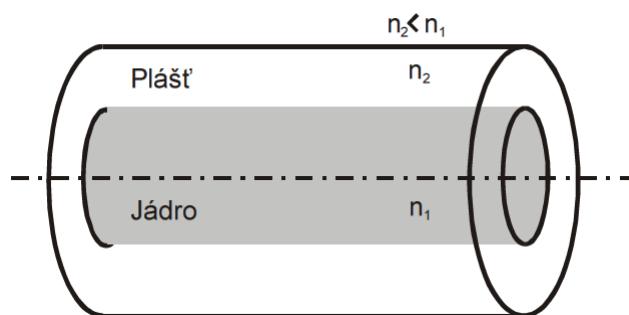
Tato diplomová práce se zabývá problematikou mikroohybových optovláknových snímačů. Tyto snímače patří do skupiny snímačů porušující okrajových podmínek šíření světla. V praxi mají mikroohyby řadu využití (např. snímače tlaku, síly). V této práci bude proveden návrh laboratorní úlohy vycházející z poznatků získaných z jednotlivých experimentů.

Cílem práce je provést rešerši, seznámení se s principem optovláknových snímačů využívajících mikroohybů, navrhnout a realizovat testovací přípravky pro experimentální odzkoušení vlivu velikosti a hustoty deformačních hrotů na velikost přenášeného signálu. Dále otestovat použití těchto snímačů pro měření hmotnosti, síly, výšky hladiny v nádobě a následně z provedených měření navrhnout laboratorní úlohu použitou v předmětu Optovláknové snímače (MOES).

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Optická vlákna [5, 7, 8]

Optické vlákno je vyrobeno z nízko ztrátového materiálu (např. křemenné sklo). Vlákno je tvořeno jádrem a vnějším obalem viz Obrázek 1. Jádro slouží k přenosu záření. Vnější plášť má nepatrně menší hodnotu indexu lomu. Světelný paprsek přivedený k optickému vláknu pod úhlem menším než je kritický je vlákem veden pomocí úplného odrazu na rozhraní jádro-plášť. Přivedený světelný paprsek pod větším úhlem utíká do pláště a není vlákem veden. Preferované měděné koaxiální kabely jsou nahrazovány díky svým vlastnostem (malé rozměry a hmotnost, odolnost proti elektromagnetické interferenci a přeslechům, nízké ztráty při přenosu, enormní šířka pásma atd.) optickými vlákny. Jejich uplatnění je od dálkových telefonních komunikací až po místních počítačových sítích. V optice se používají tři přenosová pásma (850 nm-mnohomódová vlákna, 1300 nm-mnohomódová vlákna, 1550 nm-jednomódová vlákna).



Obrázek 1: Optické vlákno[7]

1.1.1 Dělení optických vláken [5, 7, 8]

- **Jednomódová** (SI-SM „Step Index Singlemode“)

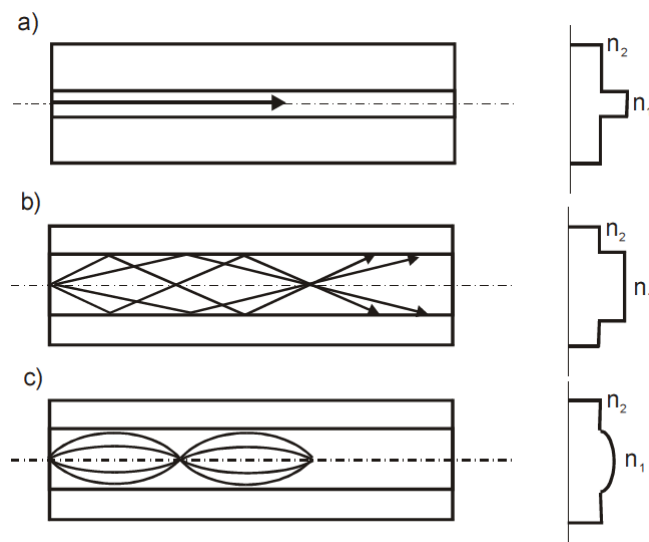
Poloměr jádra je natolik malý, že se záření šíří pouze jedním módem. Změna indexu lomu jádra je skoková. Viz Obrázek 2 a). Výhodou těchto vláken oproti mnohomódových vláken je větší šířka přenosového pásma, přenos na delší vzdálenosti, menší utlum a disperze.

- **Mnohomódová** (MM „Multimode“)

Mají větší poloměr jádra než jednomódová vlákna a k šíření světla se využívá více módů. Problémem u použití více módů spočívá v různé grupové rychlosti jednotlivých módů. Tato skutečnost má za následek rozšíření přenášeného impulzu a tím i omezení času k vyslání dvou po sobě jdoucích impulzů, aniž by došlo k jejich překrytím během přenosu.

Pro snížení roztažení impulzu se používají vlákna s postupnou změnou indexu lomu. Viz Obrázek 2 c). Nejmenší hodnota indexu lomu je na rozhraní jádro-plášť a směrem ke středu jádra tato hodnota roste.

Běžná mnohomódová vlákna se skokovou změnou indexu lomu mají konstantní index lomu. Viz Obrázek 2 b). Výhodou těchto vláken oproti jednomódovým je větší hodnota numerické apertury, snadnější spojování vláken, možnost budit pomocí LED.



Obrázek 2: Geometrické uspořádání, profil lomu a typické paprsky: a) jednomódové vlákno, b) mnohomódové vlákno se skokovou změnou indexu lomu, c) mnohomódové vlákno s gradientní změnou indexu lomu [7]

U vláken se skokovou změnou indexu lomu se světlo šíří úplným odrazem. U vláken s plynulou změnou indexu lomu (gradientních) se používá nepřetržitý lom světla.

Tabulka 1: Charakteristiky různých typů optických vláken [7]

Typ vlákna	Mnohovidové se skokovou změnou indexu lomu	Mnohovidové s plynulou změnou indexu lomu	Jednovidové se skokovou změnou indexu lomu
Průměr jádra [μm]	50 – 450	30 – 60	3 – 10
Průměr pláště [μm]	125 – 500	100 – 150	50 – 125
Průměr primární ochrany [μm]	250 - 1000	250 – 1000	250 – 1000
Číselná apertura	0,15 – 0,5	0,2 – 0,3	0,08 – 0,15
Index lomu jádra	Asi 1,48	Asi 1,48	Asi 1,46
Index lomu pláště	Asi 1,45	Asi 1,46	Asi 1,456
Útlum [dB/km] při vlnové délce 0,85 μm	Méně než 5	2 – 10	2 – 5
Šířka pásma pro 1 km	6 – 25 MHz	150 MHz – 2GHz	Více jak 40 GHz

1.2 Optické vláknové snímače [1, 3]

Řady úspěchů s použitím optických vláknových snímačů bylo dosaženo v měření teploty v biologických aplikacích a chemické analýze. Nicméně, široké využití v řízení procesů a vojenské aplikace nedošlo, nebo byl jen velmi pomalý rozvoj.

Existuje totiž mnoho překážek pro široké zavedení sensorové technologií. Na hlavní překážku poukázal už Kersey a to že v oblastech jako je řízení procesů jsou dobře zavedené technologie, které fungují dobře a jsou cenově výhodné. Používání optických vláknových senzorů je omezeno i jejich cenou. Mnoho aplikací lze dosáhnout konvenční technologií, která je často výrazně levnější. Velké uplatnění vláknové optické senzory nacházejí v oblastech snímání magnetického pole, gyroskopů a chemických rozborů.

Pro přenos informace v optice slouží optická vlákna. Optická vlákna se používají jak v komunikačních tak nekomunikačních aplikacích. Široké zastoupení optických systémů v přenosu informací pomohl rozvoj technologií výroby optických vláken a optických prvků. Díky zlepšujícím se vlastnostem, klesající ceně a nepoužívání strategických surovin roste zastoupení aplikací optických vláknových komunikačních systémů v různých odvětvích průmyslu, medicíně a jiných.

Z nekonvenčních aplikací optických vláken mají největší praktický význam optické vláknové senzory. Slouží pro měření různých fyzikálních veličin (zrychlení, síla, rychlost, tlak, teplota, intenzita elektrického a magnetického pole atd.), chemických veličin (pH, koncentrace kyslíku, glukózy atd.), biologických veličin. V současné době pro měření takřka všech fyzikálních (chemických, biologických) veličin existují optické snímače. Jejich mnohé vlastnosti převyšují vlastnosti tradičních senzorů.

Na vstupu optických vláknových senzorů je umístěn zdroj optického záření (dioda, laser dioda, lasery) sloužící k zavedení optického signálu do optického vlákna. Na výstupu je umístěn fotodetektor (fotodioda, fototranzistor, fotorezistor) pro detekci modulovaného optického signálu.

1.2.1 Výhody optických vláknových senzorů [1, 3,6]

- Odolnost proti agresivnímu prostředí, elektromagnetickému rušení.
- Velká šířka frekvenčního pásma.
- Rychlá odezva. Jednoduchá konstrukce.
- Malé hmotnosti a rozměry.
- Bezkontaktní měření.
- Měření na dálku.
- Měření v prostředí člověku nebezpečných (hořlavé, výbušné atd.).
- Vysoká citlivost.
- Malé tlumení signálu (oproti kovovým).
- Nízká energetická náročnost atd.

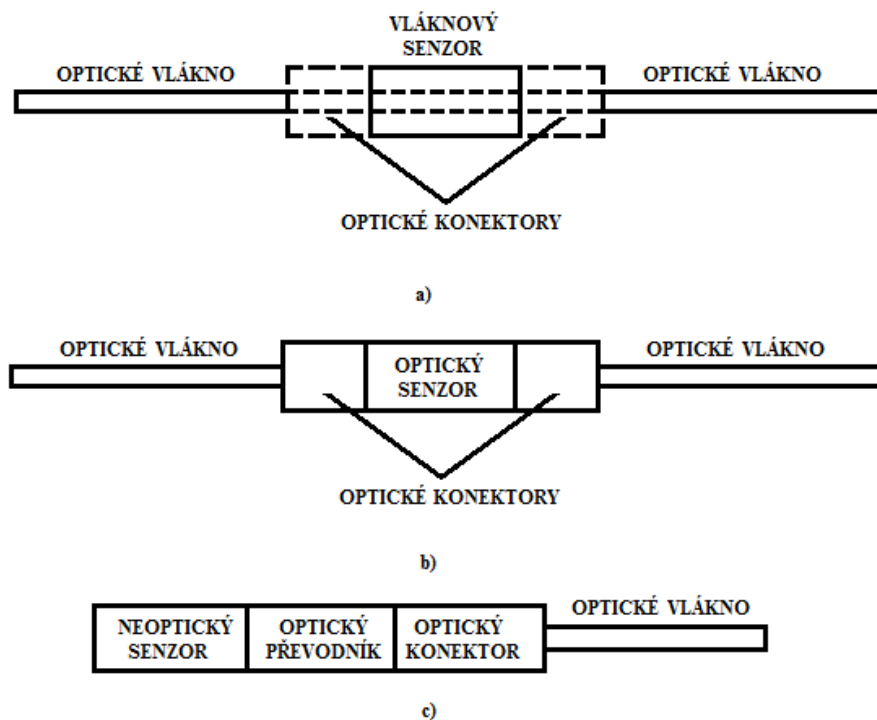
1.2.2 Požadavky na optické vláknové snímače [1, 3,6]

- Citlivost
- Dynamika
- Stabilita
- Linearita
- Přesnost
- Rozměry a hmotnost
- Ekonomické parametry

1.2.3 Dělení optických vláknových senzorů [1, 3]

Optické vláknové senzory lze dělit podle různých hledisek. V řadě literatur se toto dělení odlišuje. Všeobecně můžeme optické vláknové senzory rozdělit do dvou skupin.

- **Vlastní** (optické vlákno tvoří citlivou část => snímaná veličina ovlivňuje optické vlákno => mění se přenášený signál v optickém vlákně) viz Obrázek 3 a).
- **Nevlastní** (optické vlákno slouží pouze pro přenos signálu) viz Obrázek 3 b).



Obrázek 3: Konstrukce optických vláknových senzorů a) vlastní, b) nevlastní optický senzor, c) nevlastní neoptický senzor [3]

Jedno z nejpoužívanějších dělení optických vláknových snímačů je [1, 3,6]

- Podle měřených fyzikálních veličin
- Podle modulace
- Podle konstrukce
- Podle použitého optického vlákna

A) Podle měřených fyzikálních veličin [1, 3,6]

- Mechanické
- Chemické
- Elektrické
- Tepelné
- Magnetické
- Biologické

B) Podle druhu použitého optického vlákna [1, 3]

- Jednovidové senzory:

Používají jednovidové optické vlákna a koherentní zdroj záření.

- Mnohovidové senzory:

Používají mnohovidové optické vlákna a nekoherentní zdroj.

C) Podle metody měření [1, 3,6]

- Analogové
- Číslicové

D) Podle způsobu modulace optického signálu [1, 3,6]

- Amplitudové:

Modulace intenzity (amplitudy) světla v optickém vlákně.

- Fázové:

Modulace fáze optického signálu v optickém vlákně.

- Polarizační:

Polarizace světelné vlny v optickém vlákně se mění v závislosti na velikosti měřené veličiny.

- Frekvenční:

Modulace frekvence optického signálu (Dopplerový jev) v optickém vlákně.

- Senzory s modulací rozložení vlnové délky:

Detekce spektrálně závislých změn.

- Senzory s modulací šířky a polohy přenášených optických impulzů:

Zkoumání zpoždění a rozšíření impulzu způsobené v uzavřené smyčce optického vlákna.

1.2.4 Amplitudové optické vláknové senzory [1, 3,6]

Patří mezi nejrozšířenější typy optických vláknových senzorů. Předností je poměrně jednoduchá konstrukce, používání mnohovidových optických vláken a nízká cena.

Modulace přenášeného optického signálu se u amplitudových optických senzorů provádí:

- Změnou tlumení.
- Změnou přechodu a odrazu světla.
- Změnou vzájemných vazeb světlovou.
- Porušením okrajových podmínek šíření světla v optickém prostředí.

Senzory s porušením okrajových podmínek šíření světla [1, 3,6,13]

Tyto senzory jsou velmi citlivé a kompaktní. Velkou předností je jednoduché optické schéma. Patří mezi významnou skupinu amplitudových optických vláknových senzorů. Vlivem měřené fyzikální veličiny dochází k porušení okrajových podmínek šíření světla v optickém vlákne (světlovou.). Jednou z nejčastějších porušených podmínek šíření světla je porušení úplného odrazu (jádro-plášť). Pro dvě prostředí s indexy lomu n_1, n_2 platí podmínka úplného odrazu:

$$\Theta_d \geq \sin \frac{n_2}{n_1} \quad (1.1)$$

Kde n_1 je index lomu prostředí ve kterém se šíří světlo,

Θ_d úhel dopadu.

Z tohoto vztahu (1.1) vyplývá, že k porušení okrajových podmínek dojde při změně geometrie (zakřivení) vlnovodu (mění se úhel dopadu), při změně poměru jednotlivých indexů lomu.

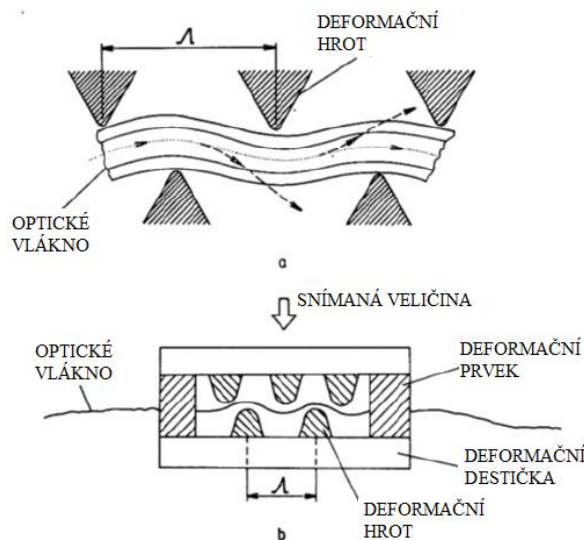
Skupina senzorů využívající k porušení okrajových podmínek šíření světla změnou geometrie, pracují na principu mikroohybových optických vláken.

Kritický poloměr [1, 3,6]

$$R_c = \frac{3 * n_1 * \lambda}{4 * \pi \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^3}} \quad (1.2)$$

Kde n_1, n_2 je index lomu jádra (pláště) optického vlákna,

λ vlnová délka světla.



Obrázek 4: Mikroohybový optický vláknový senzor a) ukázka přechodu vedeného světla mimo jádro vlákna b) princip práce mikroohybového optického vláknového senzoru [6]

Kritický poloměr vzniká při ohybu optického vlákna. Pokud optické vlákno ohneme pod kritickým úhlem, nastane pro vidy vyšších řádů porušení okrajových podmínek (viz Obrázek 4 a)). To znamená, že tyto vidy se odrazí na rozhraní jádro-plášť do pláště a budou vedeny pláštěm (plášťové vidy), nebo uniknou do okolního prostředí. V důsledku poklesu přenášených vidů dojde k poklesu intenzity světla přenášeného jádrem optického vlákna. V senzorech využívající mikroohyby se měří pokles intenzity vystupujícího světla z konce jádra, nebo nárůst intenzity světla, který uniká přes plášť do okolního prostředí.

Modulační index [1, 3,6]

$$Q = \frac{dT_f}{dx} * \frac{dx}{dp} \quad (1.3)$$

Kde T_f je přenos optického vlákna,

p působící tlak,

x vzdálenost deformačních destiček senzoru.

Ze vztahu (1.3) vyplývá, že modulační index závisí na dvou parametrech. Na optických vlastnostech optického vlákna (citlivost na mikroohyby) $\frac{dT_f}{dx}$. Na mechanických

vlastnostech senzoru (ohybnost optického vlákna, ozubení deformačních destiček atd.)

$$\frac{dx}{dp}$$

Maximální ztráty v optickém vlákne nastávají, pokud se vlnové číslo rovná rozdílu vlnových čísel vedených vidů a vyzářených vidů.

$$\beta - \beta' = \pm \frac{2 * \pi}{\Lambda} \quad (1.4)$$

Kde Λ je perioda mikroohybů.

Podélná konstanta šíření [1, 3,6,14]

$$\delta\beta = \left(\frac{\alpha}{\alpha + 2} \right)^{\frac{1}{2}} * \frac{2\sqrt{\Delta}}{a} * \left(\frac{m}{M} \right)^{\frac{a-2}{a+2}} \quad (1.5)$$

Kde m je číslo vidu,

M celkový počet vidů,

a poloměr jádra,

α konstanta sloužící k určení profilu indexu lomu jádra,

Δ relativní rozdíl indexu lomu pláště a jádra optického vlákna.

Pro optická vlákna s parabolickým průběhem indexu lomu platí:

$$\delta\beta = \frac{(2 * \Delta)^{\frac{1}{2}}}{a} \quad (1.6)$$

Pro optická vlákna se skokovou změnu indexu lomu platí:

$$\delta\beta = \frac{2 * \Delta^{\frac{1}{2}}}{a} * \frac{m}{M} \quad (1.7)$$

Pro změnu přenosu optického vlákna ΔT_f při změně vzdálenosti deformačních destiček Δx vyvolané měřenou fyzikální veličinou ΔE platí vztah:

$$\Delta T_f = \frac{\Delta T_f}{\Delta x} * \Delta x = \frac{\Delta T_f}{\Delta x} * D * \Delta E \quad (1.8)$$

Kde D je koeficient, který nezávisí na změně měřené fyzikální veličině.

Pro změnu přenosu optického vlákna v závislosti na změně síly ΔF působící na deformační destičky platí vztah:

$$\Delta T_f = \left(\frac{\Delta T_f}{\Delta x} \right) * \Delta F * \left(K_f + \frac{A_s * Y_s}{L_s} \right)^{-1} \quad (1.9)$$

Kde ΔF je koeficient deformací optického vlákna při ohnutí,

A_s plocha průřezu,

Y_s Youngov modul,

L_s délka deformačních prvků.

Podle konstrukce deformačních prvků se senzor používá pro měření různých fyzikálních veličin (senzor- tlaku, teploty, zrychlení, magnetického pole, elektrického pole a jiné).

Senzor tlaku [6]

$$\Delta T_f = \left(\frac{\Delta T_f}{\Delta x} \right) * A_p * \left(K_f + \frac{A_s * Y_s}{L_s} \right)^{-1} * \Delta p \quad (1.10)$$

Kde Δp změna tlaku.

Senzor teploty [6,14]

$$\Delta T_f = \left(\frac{\Delta T_f}{\Delta x} \right) * A_p * \alpha_s * Y_s * \left(K_f + \frac{A_s * Y_s}{L_s} \right)^{-1} * \Delta \Theta \quad (1.11)$$

Kde α_s je koeficient teplotní roztažnosti deformačních prvků,

$\Delta \Theta$ změna teploty.

Senzor zrychlení [6,14]

$$\Delta T_f = \left(\frac{\Delta T_f}{\Delta x} \right) * m_p * \left(K_f + \frac{A_s * Y_s}{L_s} \right)^{-1} * \Delta a \quad (1.12)$$

Kde m_p je hmotnost deformační destičky,

Δa změna zrychlení.

Senzor intenzity magnetického, nebo elektrického pole [6,14]

$$\Delta T_f = \left(\frac{\Delta T_f}{\Delta x} \right) * d_{33}^{H,E} * L_s * \Delta H (\text{nebo } \Delta E) \quad (1.13)$$

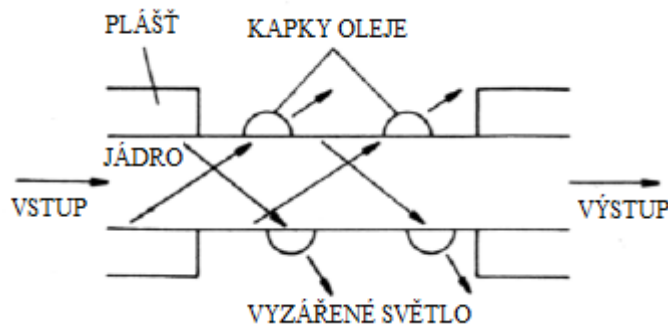
Kde ΔH je změna magnetického,

ΔE změna elektrického pole,

$d_{33}^{H,E}$ magnetostrikční koeficient, nebo piezoelektrická síla materiálu deformačního prvku při působení magnetického (H) nebo elektrického (E) pole.

Citlivé senzory optické hustoty, koncentrace [1, 3,6]

Konec vlákna nebo jeho část je holé jádro ponořené v kapalině. Přesnost měření je velmi velká (relativní chyba je 10^{-3} až 10^{-4}). Používají se například pro měření koncentrace oleje ve vodě (viz Obrázek 5).

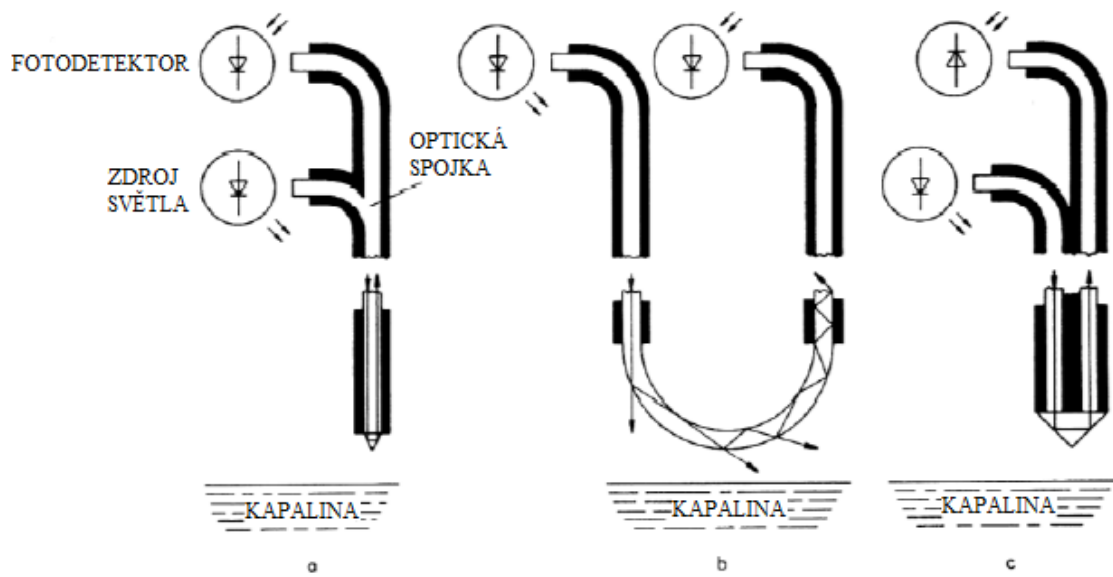


Obrázek 5: Optický vláknový senzor koncentrace oleje ve vodě [6]

Principem činnosti tohoto senzoru je založen na tom, že při kontaktu holého jádra s olejem (změní se poměr n_2/n_1) se zmenšuje intenzita přenášeného světla v jádru vlákna. Koncentrace se potom určuje v závislosti na intenzitě přenášeného světla.

Senzor výšky hladiny [1, 3,6]

Vlákno ve tvaru U nebo vhodně zakončené vlákno se používá pro zjištění výšky hladiny agresivních, výbušných a hořlavých kapalin (viz Obrázek 6). Jejich hlavní výhodou je odolnost vůči agresivnímu prostředí, malé rozměry, velká přesnost, bezpečnost.



Obrázek 6: Optické vláknové senzory výšky hladiny kapaliny a) jednovláknový, b) s vláknem ve tvaru U, c) dvouvláknový s optickým hranolem [6]

2 MĚŘICÍ PŘÍPRAVEK A DESTIČKY

2.1 Přípravek

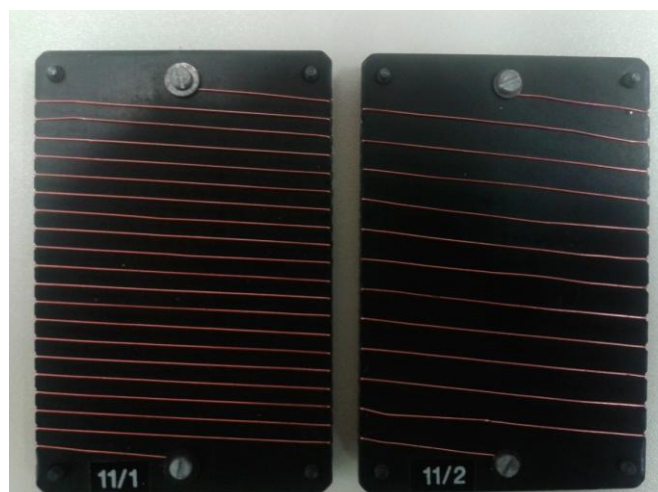
Pro jednotlivé experimenty byl vytvořen měřicí přípravek, který jde vidět na Obrázku 7. Měřicí přípravek je přichycen na desku a je tvořen vyvažovacím šroubem, závěsným systémem. Závěsný systém slouží pro umístění závaží, nebo kádinky. Místo tohoto systému jde jednoduše připojit digitální měřič síly. Rozměry částí přípravku jsou: nádobka $\varnothing 10$ cm, deska 22x46 cm, přední rameno 30 cm, zadní rameno 11 cm.



Obrázek 7: Vytvořený přípravek

2.2 Měřicí destičky

Pro vytvoření mikroohybů v optickém vlákne byly vyrobeny destičky s hroty, které jsou tvořeny navinutým drátem. Vyrobené destičky jsou zachyceny na Obrázku 8.



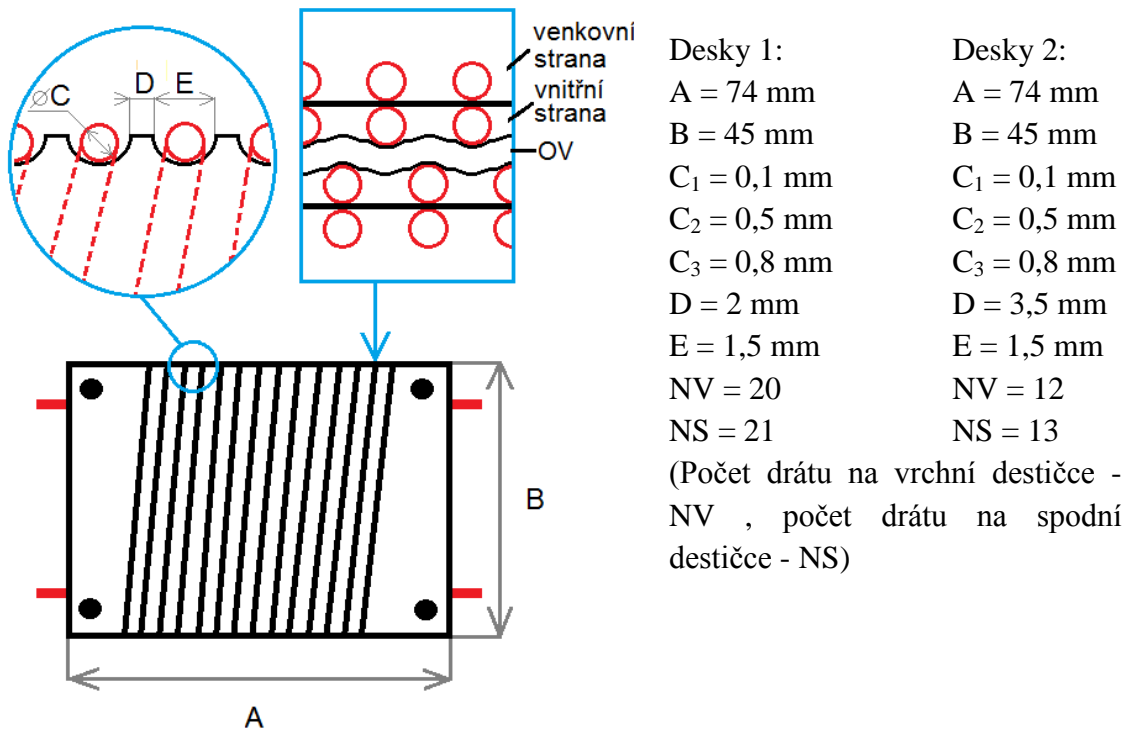
Obrázek 8: Použité destičky 11/1 a 11/2

Rozměry jednotlivých destiček jsou zaznamenány v kapitole rozměry použitých destiček na Obrázku 10. Desky 1 (označené 11/1) mají oproti deskám 2 (označené 11/2) větší hustotu hrotů. Poloha destiček v měřicím přípravku je taková, že přípravek působí na jejich středu. Hmotnost závaží nebo tah siloměru se na vytvořené destičky přenáší pomocí měřicího přípravku přes páku. Použité dráty tvořící hroty byly o průměru 0,1 mm, 1,5 mm a 0,8 mm. Tyto dráty jsou vidět na Obrázku 9.



Obrázek 9: Použité dráty o průměru 0,5 mm a 0,8 mm

2.2.1 Rozměry použitých destiček



Obrázek 10: Zvětšený pohled na okraj a bok použitých destiček

3 PRAKTICKÁ MĚŘENÍ

Pomocí vytvořeného přípravku se působí na destičky s deformačními hroty způsobující mikroohyby ve vlákně. Cílem prováděných experimentů je zjistit vliv velikosti a hustoty deformačních hrotů na přenášený výkon. Z poznatků získaných z jednotlivých experimentů se má navrhnout optimální zadání laboratorní úlohy do předmětu Optovláknové snímače (MOES).

3.1 Použité měřicí přístroje:

- Zdroj: LED LIGHT SOURCE, výrobce: PROMAX, výrobní číslo: PL 810AES010 (viz Obrázek 11 a))
- Detektor: OPTICAL POWER METER, výrobce: THORLABS, výrobní číslo: 11021732 (viz Obrázek 11 b))
- Digitální měřič síly: FG 5000, výrobce: MICRONIX, výrobní číslo: L 620 150 (viz Obrázek 15)
- Modré vlákno (viz Obrázek 12)
- Zkoumané vlákno (viz Obrázek 13)
- Přípravek (viz Obrázek 7)
- Použité závaží (viz Obrázek 14)
- Používané destičky (viz Obrázek 8)
- Kádinka



Obrázek 11: a) Zdroj PROLITE 81(850-1300nm), b) Detektor PM20



Obrázek 12: Modré vlákno



Obrázek 13: Zkoumané vlákno



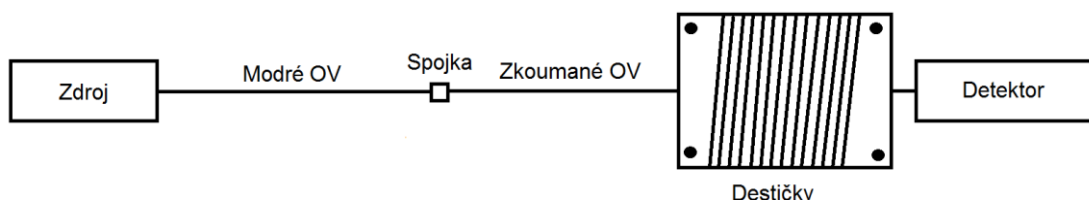
Obrázek 14: Použité závaží



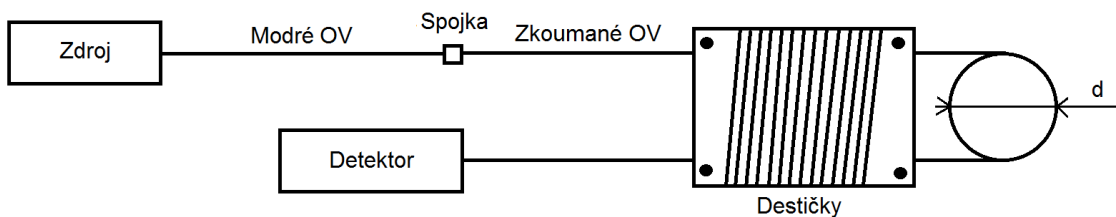
Obrázek 15: Digitální měřič síly FG 5000

3.2 Experimentální měření pro stanovení optimálního vedení optického vlákna přes destičky.

Hlavním cílem tohoto měření bylo zjistit, jestli bude optické vlákno vhodnější vést přes vyrobené destičky jednou nebo dvakrát. Používaná schémata jdou vidět na Obrázku 16 a Obrázku 17.



Obrázek 16: Schéma zapojení pro měření výkonu při rovném optickém vlákne, které je jednou vedené přes destičky.



Obrázek 17: Schéma zapojení pro měření výkonu při ohnutém optickém vlákně.

Postup měření experimentu:

V prvním kroku se destičky 1 umístili do přípravku a zapojilo se schéma zapojení z Obrázku 16. Na zdroji záření se nastavilo 850 nm a změřil se přenášený výkon P rovného vlákna bez zatížení. Následně se do závěsného systému přidávalo závaží o hmotnosti m (200 g až 1700 g) a měřil se přenášený výkon. Změřené hodnoty výkonu pro jednotlivé závaží jdou vidět v Tabulce 2.

Ve druhém kroku se změnilo schéma na zapojení z Obrázku 17. Vláknem bylo ohnuté přes válec o průměru $d = 5,8$ cm. Měření výkonu se provádělo stejným způsobem popsaným v prvním kroku. Změřené hodnoty výkonu pro jednotlivé závaží jdou vidět v Tabulce 3.

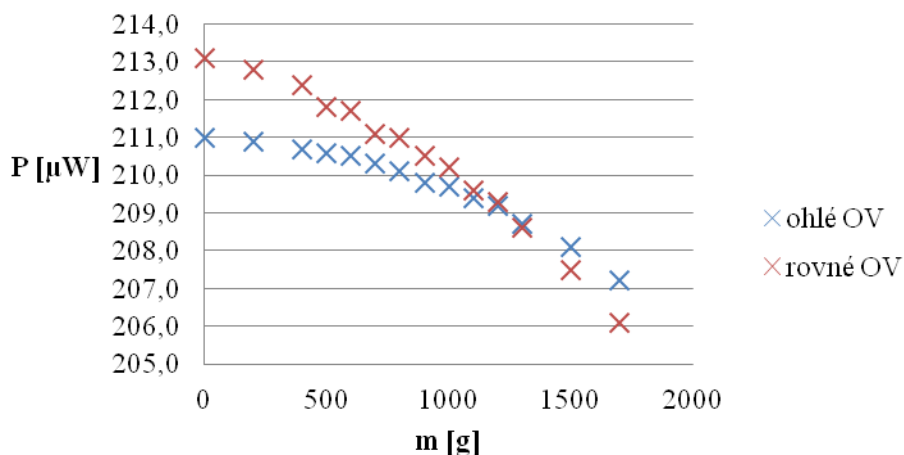
Tabulka 2: Změřené hodnoty výkonu pro rovné optické vlákno

m	P
[g]	[μ W]
0	213,1
200	212,8
400	212,4
500	211,8
600	211,7
700	211,1
800	211,0
900	210,5
1000	210,2
1100	209,6
1200	209,3
1300	208,6
1500	207,5
1700	206,1

Tabulka 3: Změřené hodnoty výkonu pro ohnuté optické vlákno

m	P
[g]	[μW]
0	211,0
200	210,9
400	210,7
500	210,6
600	210,5
700	210,3
800	210,1
900	209,8
1000	209,7
1100	209,4
1200	209,2
1300	208,7
1500	208,1
1700	207,2

Závislost výkonu ohlého a přímého OV na hmotnosti zátěže pro destičky 1



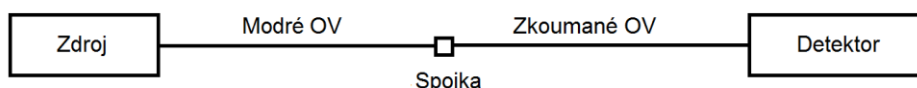
Graf 1: Závislost ohnutého a přímého optického vlákna na velikosti zátěže při použití destiček 1

Zhodnocení:

Během měření se ukázalo vhodnější zapojení z Obrázku 17, kdy je optické vlákno vedeno dvakrát přes destičky. Při vedení optického vlákna pouze jednou přes působící destičky se vrchní destička opírala o stabilizační kolíky a tím docházelo ke zkreslení výsledků. Pro další experimenty se tedy využívalo schéma zapojení z Obrázku 17.

3.3 Experimentální měření pro zkoumání vlivu průměru ohybu vlákna na přenášený výkon

Hlavním úkolem měření bylo ověřit vliv velikosti průměru válečku, sloužící pro ohnutí optického vlákna, na velikost přenášeného výkonu. Dále ze změřených výsledků vybrat nejvhodnější průměr válečku pro další experimenty. Používaná schémata jdou vidět na Obrázku 17 a Obrázku 18. Pro ohyb vlákna se používali válečky s průměrem d (1,4 cm až 7,8 cm).



Obrázek 18: Schéma zapojení pro měření výkonu při rovném optickém vlákně.

Postup měření experimentu:

V prvním kroku se zapojilo schéma zapojení z Obrázku 18. Na zdroji záření se nastavilo 850 nm a změřil se přenášený výkon rovného vlákna. Měření bylo zopakováno desetkrát a následně byl vypočítán průměrný výkon P_p . Změřené hodnoty jdou vidět v Tabulce 4.

Ve druhém kroku se změnilo schéma na zapojení z Obrázku 17. Vlákno se ohýbalo přes válec o různém průměru d (1,4 cm až 7,8 cm). Pro každou hodnotu průměru válečku se změřil desetkrát přenášený výkon. Změřené hodnoty jdou vidět v Tabulce 5.

Tabulka 4: Změřené hodnoty výkonu pro rovné optické vlákno bez zatížení

P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_p
[μ W]	[μ W]	[μ W]	[μ W]	[μ W]	[μ W]	[μ W]	[μ W]	[μ W]	[μ W]	[μ W]
213,0	212,9	213,6	212,5	212,7	212,6	213,5	212,9	213,5	213,1	213,0

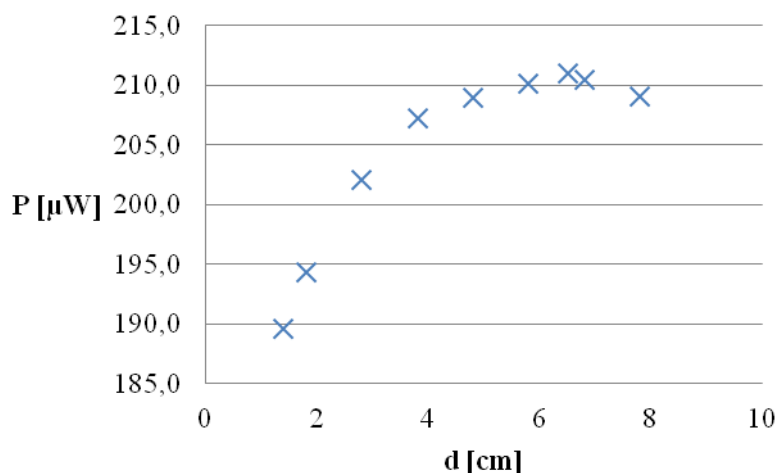
Příklad výpočtu průměrného výkonu P_p pro Tabulku 4:

$$\begin{aligned}
 P_p &= \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10}}{10} = \\
 &= \frac{213,0 + 212,9 + 213,6 + 212,5 + 212,7 + 212,6 + 213,5 + 212,9 + 213,5 + 213,1}{10} = \underline{\underline{213,0 \mu W}}
 \end{aligned}$$

Tabulka 5: Změřené hodnoty výkonu pro ohnuté optické vlákno bez zatížení

d	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	P_p
[cm]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
1,4	189,9	188,0	189,5	190,0	188,8	190,4	189,2	190,3	189,1	190,9	189,6
1,8	194,2	194,0	194,4	195,0	193,9	194,2	194,3	194,0	193,7	195,5	194,3
2,8	201,9	202,3	202,0	201,8	201,9	202,0	201,6	202,2	201,9	202,5	202,0
3,8	207,4	207,8	206,5	207,0	207,0	207,4	207,1	208,0	206,9	207,3	207,2
4,8	208,6	209,1	208,7	208,8	209,0	209,4	208,9	208,0	209,2	209,5	208,9
5,8	210,0	210,2	209,9	210,7	209,9	210,0	209,8	210,1	210,3	210,1	210,1
6,5	211,0	210,5	210,9	211,3	210,3	211,1	211,4	211,0	211,5	211,0	211,0
6,8	210,7	210,6	210,4	210,6	210,5	210,3	210,5	210,4	210,6	210,3	210,5
7,8	209,1	209,1	209,1	209,1	209,0	209,0	209,1	209,1	209,0	209,1	209,1

Závislost výkonu ohlého OV na průměru válečku



Graf 2: Závislost ohnutého optického vlákna na průměru použitého válečku

Zhodnocení:

Změřené výsledky odpovídají teoretickým předpokladům, kdy s rostoucím průměrem ohybu se zmenšoval útlum. Tato skutečnost platila až do doby, kdy se vlivem velikosti ohybu projevil útlum ohybu vlákna na straně destiček. Pro další měření byl zvolen průměr válečku 6,5 cm.

3.4 Experimentální měření pro zkoumání paměti vlákna

Hlavním úkolem měření bylo zjistit, jestli při působení síly na měřicí destičky se projeví tzv. paměť vlákna. Velikost zátěže m použitá na vytvoření mikroohybů se pohybovala od 0 do 5000 g.

Postup měření experimentu:

V prvním kroku se destičky 1 umístili do přípravku a zapojilo se schéma zapojení z Obrázku 17. Destičky 1 byly navinuté drátem o průměru 0,1 mm a použitý průměr válečku pro ohyb vlákna byl 6,5 cm. Na zdroji záření se nastavilo 850 nm. Následně se na přípravek připojil digitální měřič síly a po dobu 1 minuty se destičky zatěžovali zátěží m z intervalu 0 až 5000 g. Pro každou hodnotu zátěže m se odečetla doba t_1 , kterou optické vlákno potřebovalo, aby se po uvolnění zátěže vrátil přenášený výkon na původní hodnotu (na hodnotu výkonu před zatížením).

Ve druhém kroku se místo destiček 1 vložili do přípravku destičky 2 s drátem o průměru 0,1 mm. Měření se provedlo stejně jak v prvním kroku.

Stejný postup měření se zopakoval i pro destičky 1 a 2 při použití drátu o průměru 0,5 mm (t_2) a 0,8 mm (t_3). Změřené hodnoty pro destičky 1 jdou vidět v Tabulce 6 a pro destičky 2 v Tabulce 7.

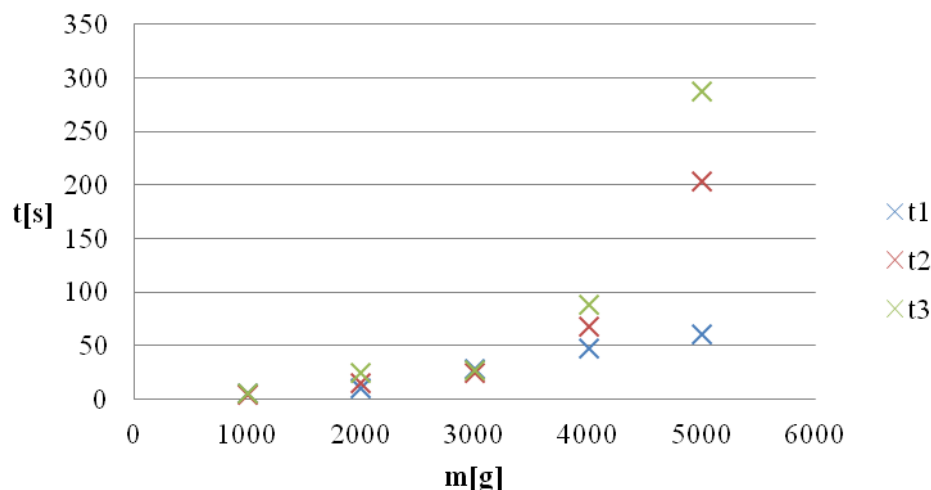
Tabulka 6: Změřené časy paměti vlákna pro destičky 1 při různé velikosti síly působící na destičky

m	t₁	t₂	t₃
[g]	[s]	[s]	[s]
1000	5	4	5
2000	10	15	24
3000	28	25	27
4000	47	68	88
5000	60	203	288

Tabulka 7: Změřené časy paměti vlákna pro destičky 2 při různé velikosti síly působící na destičky

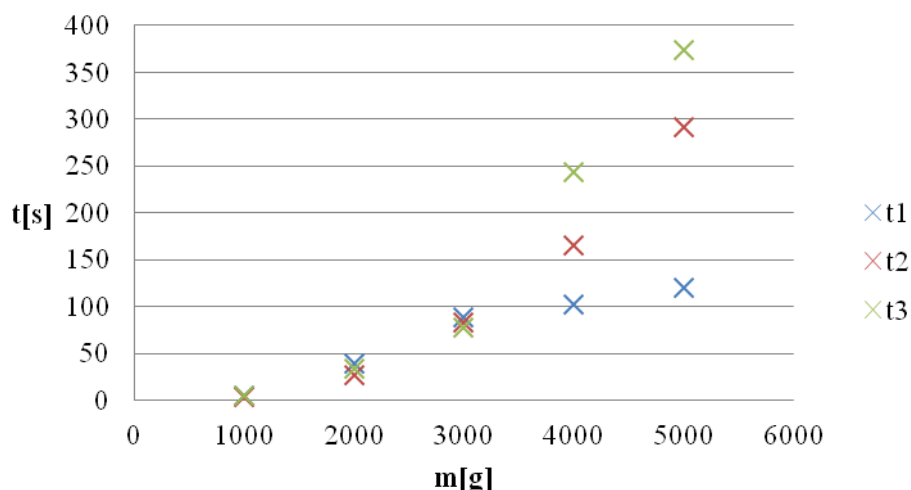
m	t₁	t₂	t₃
[g]	[s]	[s]	[s]
1000	5	4	5
2000	39	27	34
3000	88	83	77
4000	102	165	244
5000	120	291	374

Závislost času návratu na velikosti síly pro desky 1



Graf 3: Závislost velikosti časového úseku na velikosti zatížení pro desky 1 s různou velikostí deformačních hrotů (0,1; 0,5; 0,8 mm)

Závislost času na velikosti síly pro desky 2



Graf 4: Závislost velikosti časového úseku na velikosti zatížení pro desky 1 s různou velikostí deformačních hrotů (0,1; 0,5; 0,8 mm)

Zhodnocení:

Bylo zjištěno, že při zatěžování vlákna dochází k tzv. paměti vlákna. Je to čas potřebný pro návrat optického vlákna do původního stavu před zatížením. Tato skutečnost se promítla v rychlosti opakování měření v dalších experimentech.

3.5 Experimentální měření pro zkoumání vlivu velikosti zátěže na přenášený výkon- závaží

Hlavním cílem měření bylo zjistit vliv velikosti a hustoty hrotů destiček na přenášený výkon při použití závaží na destičkách 1 a destičkách 2. Velikost zátěže m použitá na vytvoření mikroohybů se pohybovala od 0 do 1700 g.

Postup měření experimentu:

V prvním kroku se destičky 1 umístili do přípravku a zapojilo se schéma zapojení z Obrázku 17. Destičky 1 byly navinuté drátem o průměru 0,1 mm a použitý průměr válečku pro ohyb vlákna byl 6,5 cm. Na zdroji záření se nastavilo 850 nm a změřila se hodnota přenášeného výkonu bez zatížení. Následně se přidávalo závaží do přípravku a pro každou hodnotu závaží se desetkrát změřil přenášený výkon. Změřené hodnoty jdou vidět v Tabulce 14.

Ve druhém kroku se místo destiček 1 vložili do přípravku destičky 2 s drátem o průměru 0,1 mm. Měření výkonu se provedlo stejným způsobem jak v prvním kroku. Změřené hodnoty jdou vidět v Tabulce 17.

Stejný postup měření se zopakoval i pro destičky 1 a 2 při použití drátu o průměru 0,5 mm (Tabulka 15, Tabulka 18) a 0,8 mm (Tabulka 16, Tabulka 19). Vypočítané průměrné hodnoty výkonu Pp1 (průměr drátu 0,1 mm), Pp2 (průměr drátu 0,5 mm) a Pp3 (průměr drátu 0,8 mm) pro destičky 1 jdou vidět v Tabulce 8. Pro destičky 2 jsou výkony Pp4 (průměr drátu 0,1 mm), Pp5 (průměr drátu 0,5 mm) a Pp6 (průměr drátu 0,8 mm) vidět v Tabulce 9.

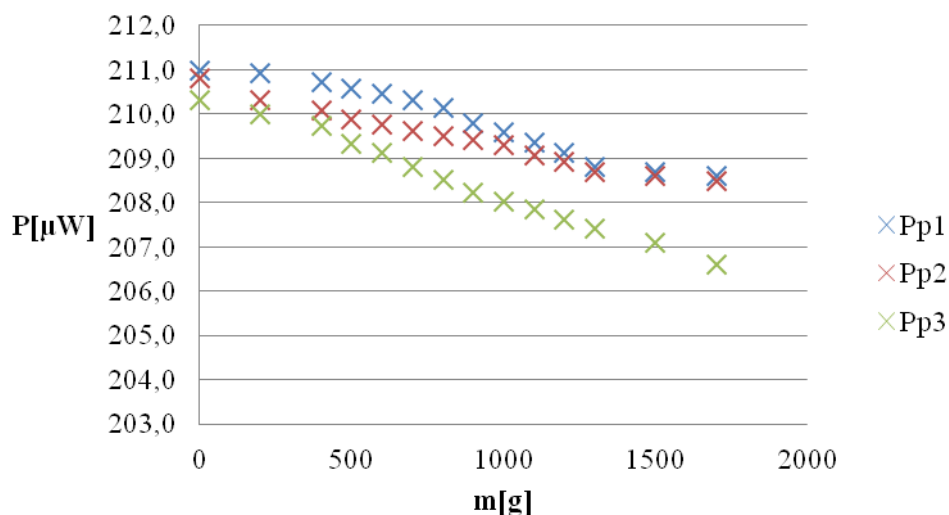
Tabulka 8: Vypočítané průměrné hodnoty výkonů z Tabulky 14, 15, 16 pro různé hodnoty závaží (použité desky 1)

m	Pp1	Pp2	Pp3
[g]	[μ W]	[μ W]	[μ W]
0	211,0	210,8	210,3
200	210,9	210,3	210,0
400	210,7	210,1	209,7
500	210,6	209,9	209,3
600	210,5	209,8	209,1
700	210,3	209,6	208,8
800	210,1	209,5	208,5
900	209,8	209,4	208,2
1000	209,6	209,3	208,0
1100	209,4	209,1	207,9
1200	209,1	208,9	207,6
1300	208,8	208,7	207,4
1500	208,7	208,6	207,1
1700	208,6	208,5	206,6

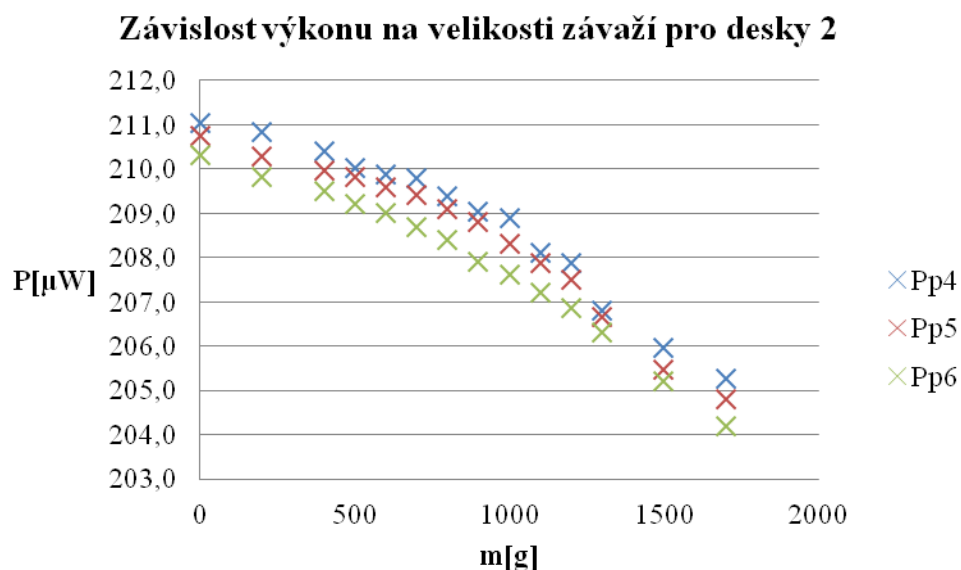
Tabulka 9: Vypočítané průměrné hodnoty výkonů z Tabulky 17, 18, 19 pro různé hodnoty závaží (použité desky 2)

m	Pp4	Pp5	Pp6
[g]	[μ W]	[μ W]	[μ W]
0	211,0	210,7	210,3
200	210,8	210,3	209,8
400	210,4	210,0	209,5
500	210,0	209,8	209,2
600	209,9	209,6	209,0
700	209,8	209,4	208,7
800	209,4	209,1	208,4
900	209,0	208,8	207,9
1000	208,9	208,3	207,6
1100	208,1	207,9	207,2
1200	207,9	207,5	206,9
1300	206,8	206,7	206,3
1500	206,0	205,5	205,2
1700	205,3	204,8	204,2

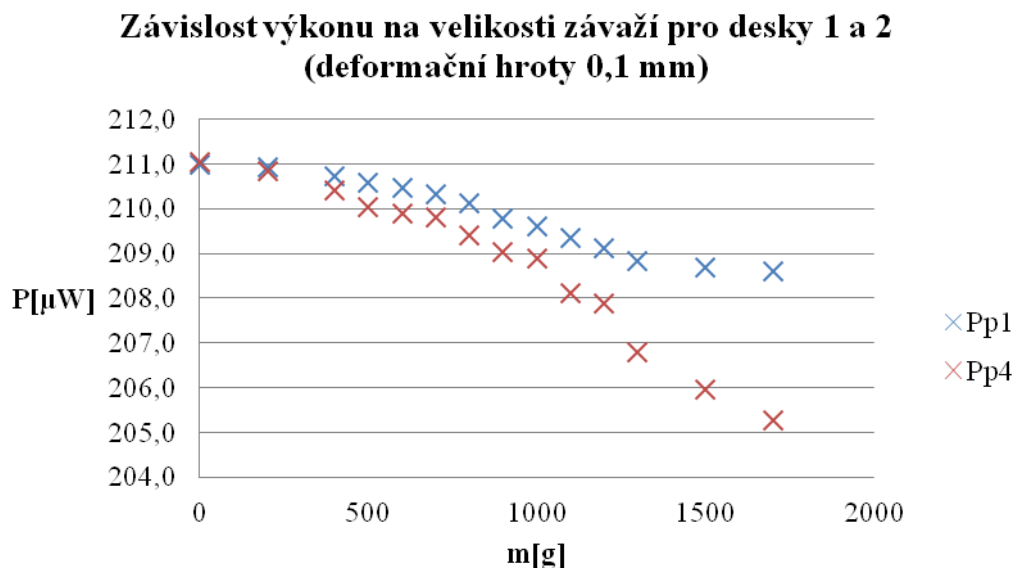
Závislost výkonu na velikosti závaží pro desky 1



Graf 5: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na velikosti závaží pro desky 1 s různou velikostí deformačních hrotů (0,1; 0,5; 0,8 mm)

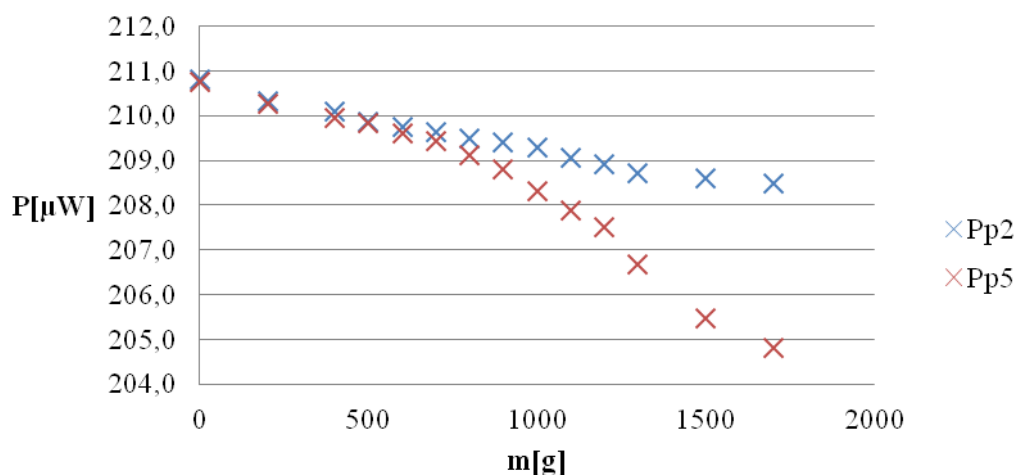


Graf 6: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na velikosti závaží pro desky 2 s různou velikostí deformačních hrotů (0,1; 0,5; 0,8 mm)



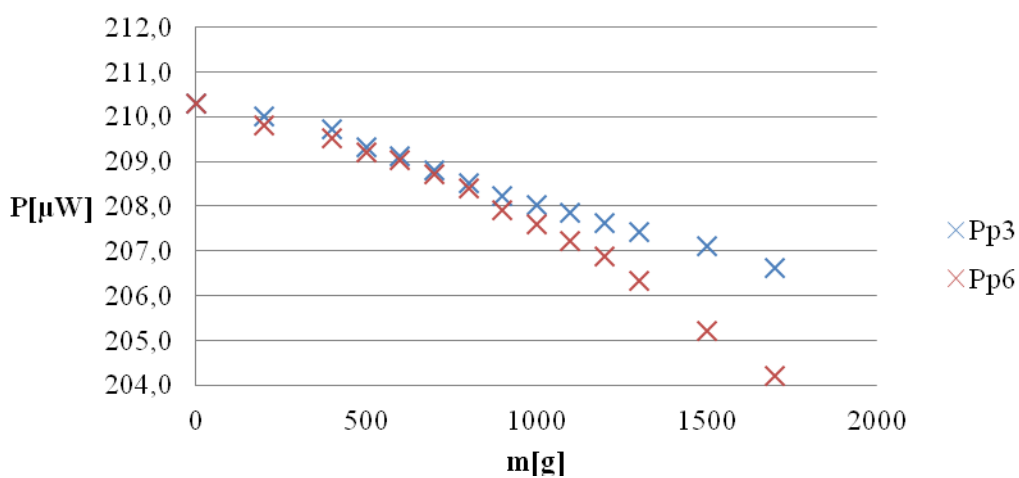
Graf 7: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na velikosti závaží pro desky 1 a 2 s použitím deformačních hrotů o velikosti 0,1 mm

**Závislost výkonu na velikosti závaží pro desky 1 a 2
(deformační hroty 0,5 mm)**



Graf 8: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na velikosti závaží pro desky 1 a 2 s použitím deformačních hrotů o velikosti 0,5 mm

**Závislost výkonu na velikosti závaží pro desky 1 a 2
(deformační hroty 0,8 mm)**



Graf 9: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na velikosti závaží pro desky 1 a 2 s použitím deformačních hrotů o velikosti 0,8 mm

3.6 Experimentální měření pro zkoumání vlivu velikosti zátěže na přenášený výkon- siloměr

Hlavním cílem měření bylo zjistit vliv velikosti a hustoty hrotů destiček na přenášený výkon při působením digitálním měřičem síly na destičkách 1 a destičkách 2. Velikost zátěže m použita na vytvoření mikroohybů se pohybovala od 0 do 5000 g.

Postup měření experimentu:

V prvním kroku se destičky 1 umístili do přípravku a zapojilo se schéma zapojení z Obrázku 17. Destičky 1 byly navinuté drátem o průměru 0,1 mm a použitý průměr válečku pro ohyb vlákna byl 6,5 cm. Na zdroji záření se nastavilo 850 nm a změřila se hodnota přenášeného výkonu bez zatížení. Následně se na přípravek připojil digitální měřič síly a pro každou hodnotu zátěže se desetkrát změřil přenášený výkon. Změřené hodnoty jdou vidět v Tabulce 20.

Ve druhém kroku se místo destiček 1 vložili do přípravku destičky 2 s drátem o průměru 0,1 mm. Měření výkonu se provedlo stejným způsobem jak v prvním kroku. Změřené hodnoty jdou vidět v Tabulce 23.

Stejný postup měření se zopakoval i pro destičky 1 a 2 při použití drátu o průměru 0,5 mm (Tabulka 21, Tabulka 24) a 0,8 mm (Tabulka 22, Tabulka 25). Vypočítané průměrné hodnoty výkonu P_{p1} (průměr drátu 0,1 mm), P_{p2} (průměr drátu 0,5 mm) a P_{p3} (průměr drátu 0,8 mm) pro destičky 1 jdou vidět v Tabulce 10. Pro destičky 2 jsou výkony P_{p4} (průměr drátu 0,1 mm), P_{p5} (průměr drátu 0,5 mm) a P_{p6} (průměr drátu 0,8 mm) vidět v Tabulce 11.

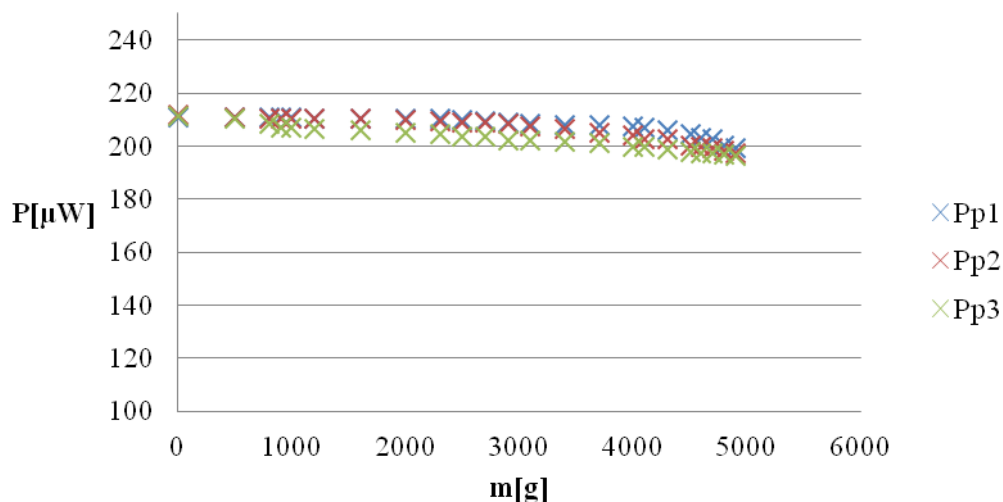
Tabulka 10: Vypočítané průměrné hodnoty výkonů z Tabulky 20, 21, 22 pro různé zatížení pomocí siloměru (použité desky 1)

m	Pp1	Pp2	Pp3
[g]	[μW]	[μW]	[μW]
0	210,9	211,6	211,3
500	210,7	210,9	210,5
800	210,7	210,5	208,3
900	210,7	210,5	207,1
1000	210,6	210,4	207,0
1200	210,5	210,3	206,6
1600	210,3	210,1	205,8
2000	210,3	210,0	205,2
2300	210,1	209,4	204,3
2500	209,9	209,1	203,7
2700	209,5	208,8	203,4
2900	208,9	208,3	202,3
3100	208,6	207,6	201,9
3400	208,1	206,5	201,5
3700	207,8	205,1	201,1
4000	207,4	203,9	199,9
4100	206,9	202,8	199,8
4300	206,0	202,4	198,7
4500	204,5	200,1	197,9
4600	203,1	199,7	197,4
4700	202,6	199,4	197,3
4800	200,1	198,1	197,0
4900	199,1	197,4	196,2

Tabulka 11: Vypočítané průměrné hodnoty výkonů z Tabulky 23, 24, 25 pro různé zatížení pomocí siloměru (použité desky 2)

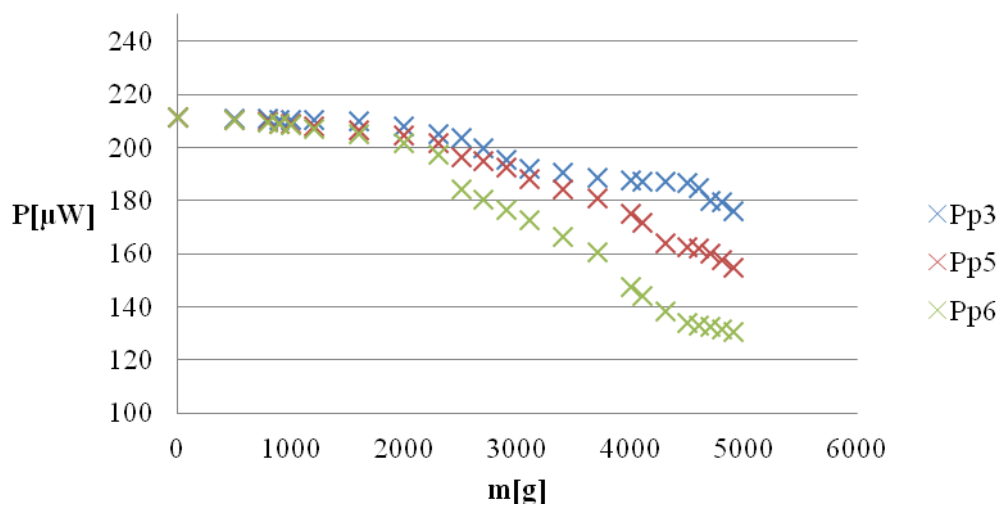
m	Pp4	Pp5	Pp6
[g]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,1	211,3	211,4
500	210,9	210,4	210,5
800	210,9	209,6	209,5
900	210,5	209,1	209,1
1000	210,2	208,7	208,5
1200	210,1	207,9	207,2
1600	209,7	206,4	204,8
2000	207,9	204,7	201,7
2300	205,1	201,8	197,2
2500	203,5	196,4	184,0
2700	199,6	194,9	180,2
2900	195,5	192,6	176,5
3100	191,9	188,0	172,5
3400	190,3	184,3	166,3
3700	188,5	180,9	160,6
4000	187,6	175,1	147,7
4100	187,1	171,8	144,3
4300	186,9	163,8	138,4
4500	186,5	162,6	134,1
4600	184,7	162,1	133,1
4700	180,0	160,1	132,4
4800	179,6	157,6	131,3
4900	176,2	154,5	130,7

Závislost výkonu na velikosti zátěže pro desky 1



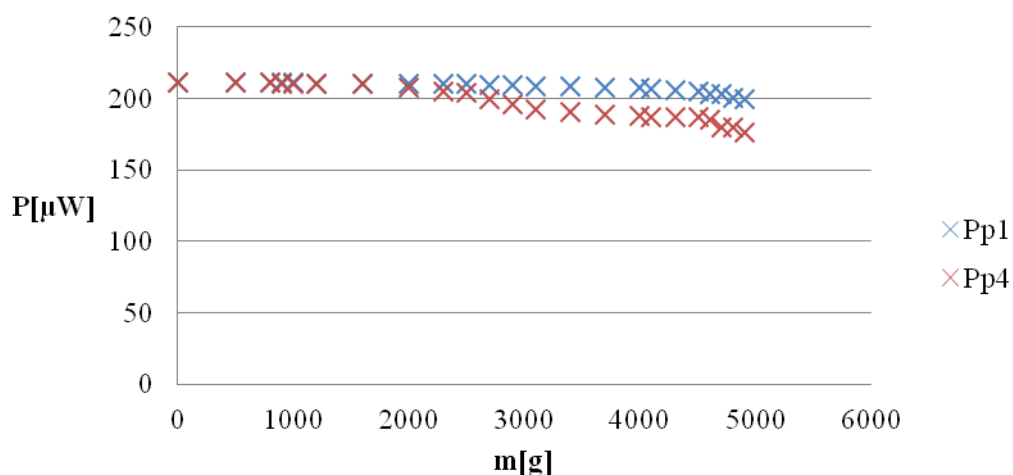
Graf 10: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na velikosti zátěže pro desky 1 s různou velikostí deformačních hrotů (0,1; 0,5; 0,8 mm)

Závislost výkonu na velikosti zátěže pro desky 2



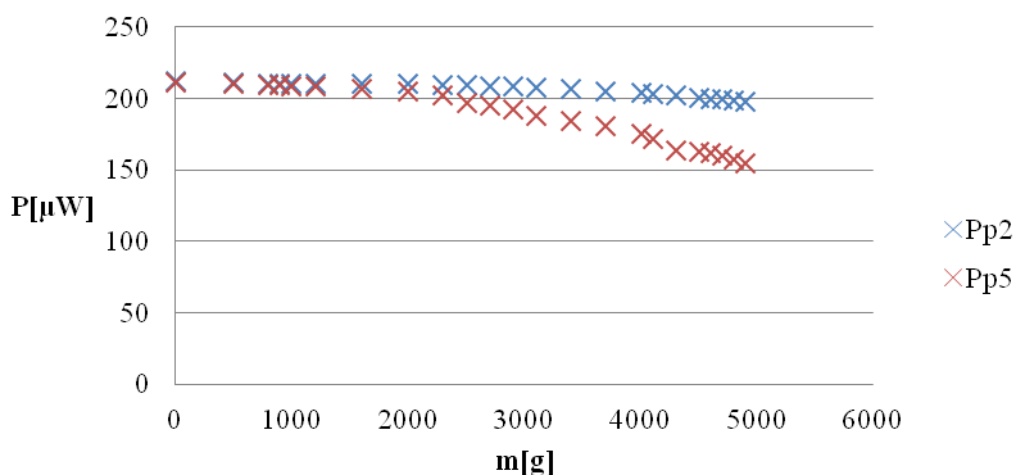
Graf 11: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na velikosti zátěže pro desky 2 s různou velikostí deformačních hrotů (0,1; 0,5; 0,8 mm)

**Závislost výkonu na velikosti hmotnosti pro desky 1 a 2
(deformační hroty 0,1 mm)**



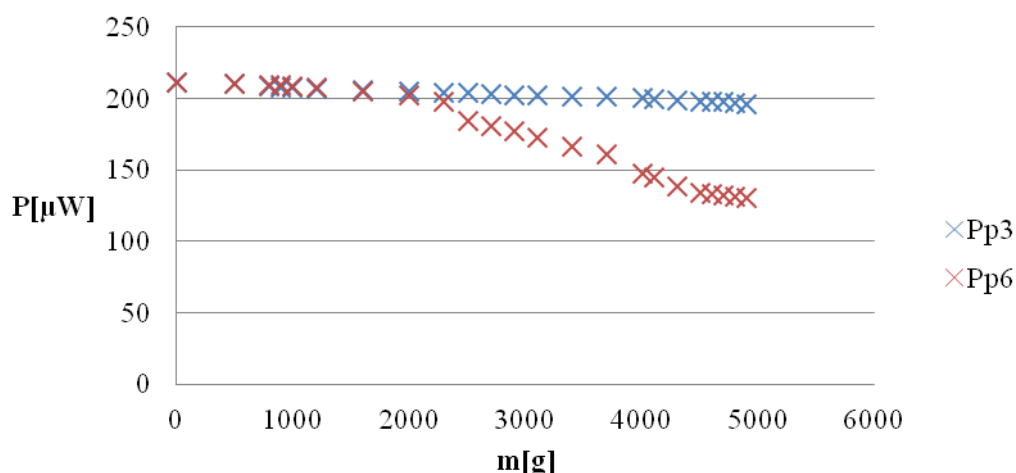
Graf 12: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na velikosti zátěže pro desky 1 a 2 s použitím deformačních hrotů o velikosti 0,1 mm

**Závislost výkonu na velikosti hmotnosti pro desky 1 a 2
(deformační hroty 0,5 mm)**



Graf 13: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na velikosti zátěže pro desky 1 a 2 s použitím deformačních hrotů o velikosti 0,5 mm

Závislost výkonu na velikosti hmotnosti pro desky 1 a 2 (deformační hroty 0,8 mm)



Graf 14: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na velikosti zátěže pro desky 1 a 2 s použitím deformačních hrotů o velikosti 0,8 mm

3.7 Experimentální měření pro zkoumání vlivu výšky hladiny v nádobě na přenášený výkon

Hlavním úkolem měření byl zjistit vliv výšky hladiny v nádobě na přenášený výkon v optickém vlákně. Do závěsného systému přípravku byla vložena kádinka o výšce $h=9$ cm a poloměru $r=3,5$ cm.

Postup měření experimentu:

V prvním kroku se destičky 1 umístili do přípravku a zapojilo se schéma zapojení z Obrázku 17. Destičky 1 byly navinuté drátem o průměru 0,1 mm a použitý průměr válečku pro ohyb vlákna byl 6,5 cm. Na zdroji záření se nastavilo 850 nm. Následně se do závěsného systému přípravku vložila kádinka a změřil se přenášený výkon při nulové výšce hladiny. Dále se do nádoby postupně přilívala voda a pro zvolenou výšku hladiny se změřil přenášený výkon. Měření se opakovalo desetkrát. Změřené hodnoty jdou vidět v Tabulce 26.

Ve druhém kroku se místo destiček 1 vložili do přípravku destičky 2 s drátem o průměru 0,1 mm. Měření výkonu se provedlo stejným způsobem jak v prvním kroku. Změřené hodnoty jdou vidět v Tabulce 29.

Stejný postup měření se zopakoval i pro destičky 1 a 2 při použití drátu o průměru 0,5 mm (Tabulka 27, Tabulka 30) a 0,8 mm (Tabulka 28, Tabulka 31). Vypočítané průměrné hodnoty výkonu Pp1 (průměr drátu 0,1 mm), Pp2 (průměr drátu 0,5 mm) a Pp3 (průměr drátu 0,8 mm) pro destičky 1 jdou vidět v Tabulce 12. Pro destičky 2 jsou

výkony Pp4 (průměr drátu 0,1 mm), Pp5 (průměr drátu 0,5 mm) a Pp6 (průměr drátu 0,8 mm) vidět v Tabulce 13.

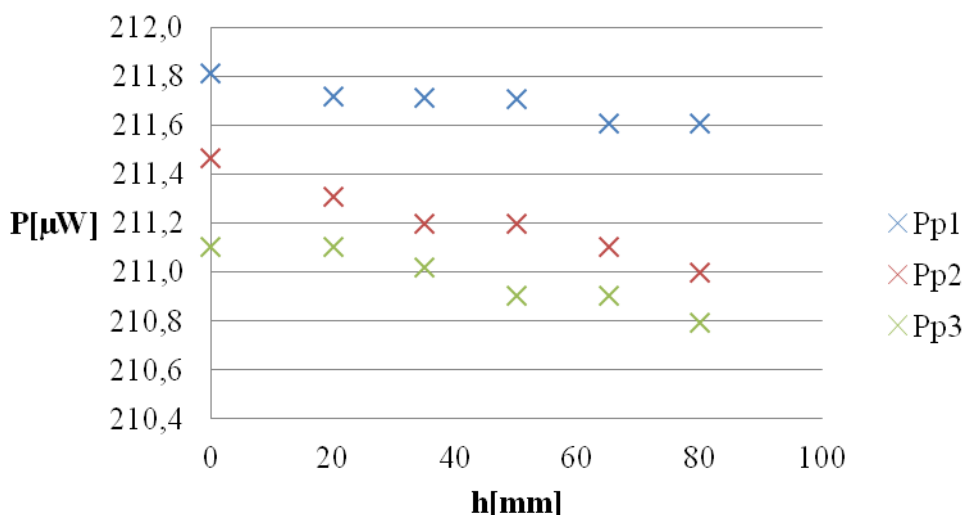
Tabulka 12: Vypočítané průměrné hodnoty výkonů z Tabulky 26, 27, 28 pro různou výšku hladiny (použité desky 1)

h	Pp1	Pp2	Pp3
[mm]	[μ W]	[μ W]	[μ W]
0	211,8	211,5	211,1
20	211,7	211,3	211,1
35	211,7	211,2	211,0
50	211,7	211,2	210,9
65	211,6	211,1	210,9
80	211,6	211,0	210,8

Tabulka 13: Vypočítané průměrné hodnoty výkonů z Tabulky 29, 30, 31 pro různou výšku hladiny (použité desky 2)

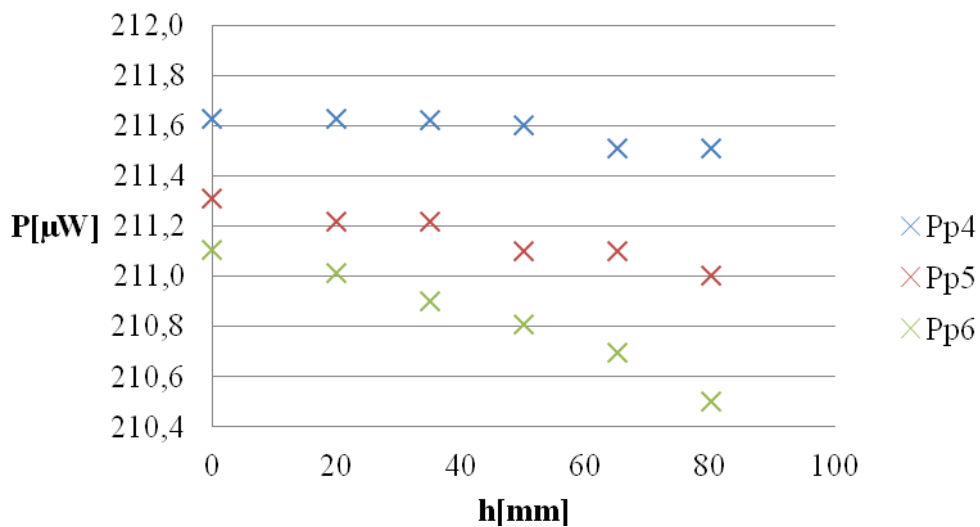
h	Pp4	Pp5	Pp6
[mm]	[μ W]	[μ W]	[μ W]
0	211,6	211,3	211,1
20	211,6	211,2	211,0
35	211,6	211,2	210,9
50	211,6	211,1	210,8
65	211,5	211,1	210,7
80	211,5	211,0	210,5

Závislost výkonu na výšce hladiny pro desky 1



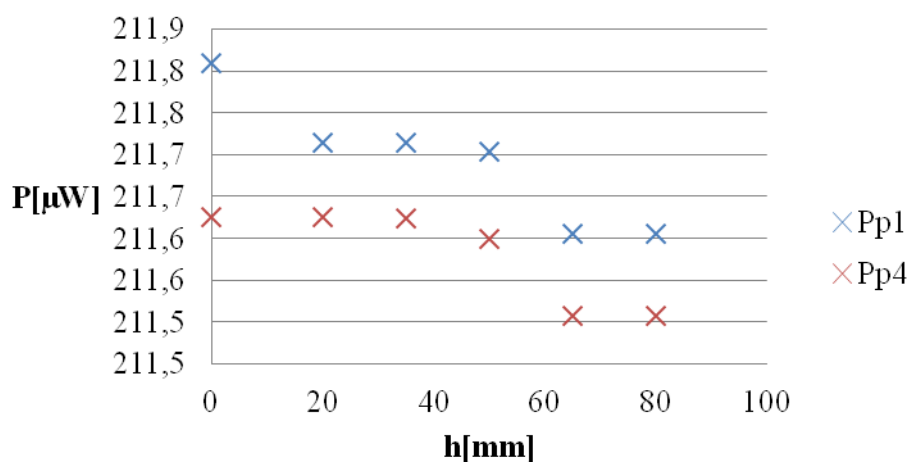
Graf 15: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na výšce hladiny v nádobě pro desky 1 s různou velikostí deformačních hrotů (0,1; 0,5; 0,8 mm)

Závislost výkonu na výšce hladiny pro desky 2



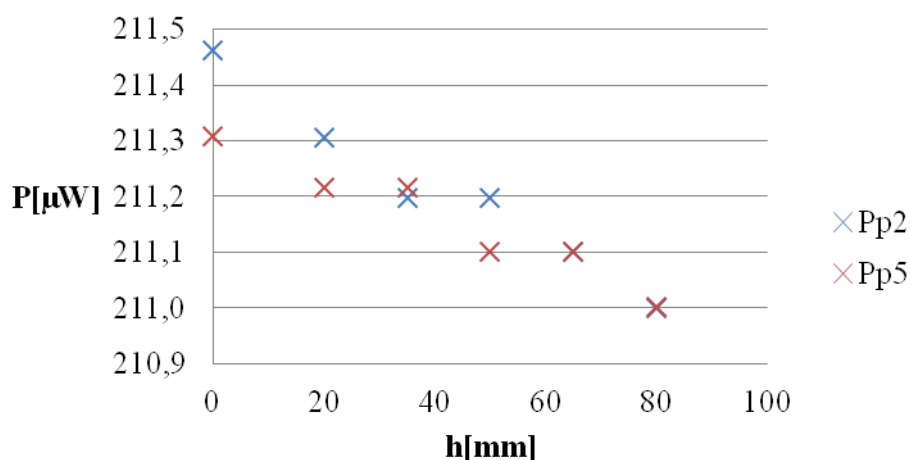
Graf 16: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na výšce hladiny v nádobě pro desky 2 s různou velikostí deformačních hrotů (0,1; 0,5; 0,8 mm)

Závislost výkonu pro desky 1 a 2 na výšce hladiny pro hroty o průměru 0,1 mm



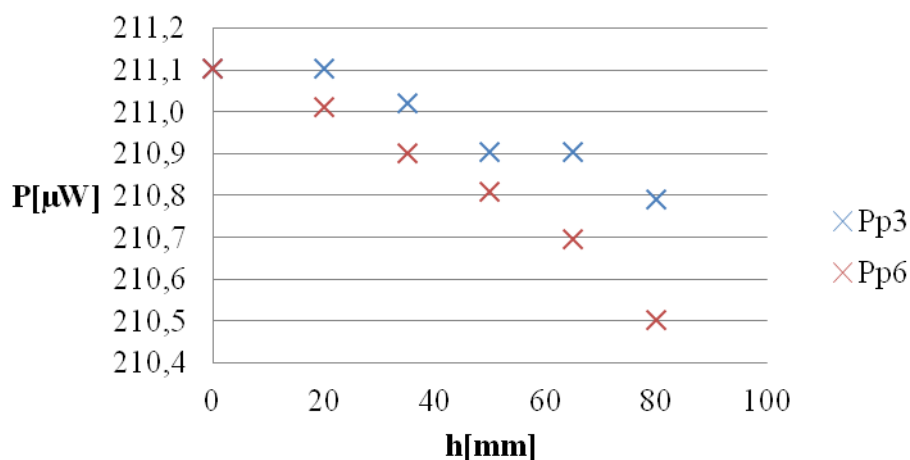
Graf 17: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na výšce hladiny v nádobě pro desky 1 a 2 s použitím deformačních hrotů o velikosti 0,1 mm

Závislost výkonu pro desky 1 a 2 na výšce hladiny pro hroty o průměru 0,5 mm



Graf 18: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na výšce hladiny v nádobě pro desky 1 a 2 s použitím deformačních hrotů o velikosti 0,5 mm

Závislost výkonu pro desky 1 a 2 na výšce hladiny pro hroty o průměru 0,8 mm



Graf 19: Závislost přenášeného výkonu optickým vláknem na výšce hladiny v nádobě pro desky 1 a 2 s použitím deformačních hrotů o velikosti 0,8 mm

4 NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY

Na základě provedených měření popsaných v kapitole č. 3 jsem navrhl laboratorní úlohu do předmětu Optovláknové snímače. Uspořádání návrhu bylo realizováno podle zadání laboratorních úloh v předmětu Optovláknové snímače (MOES). Návrh je vytvořen pro aplikaci v příštím roce v laboratořích tohoto předmětu.

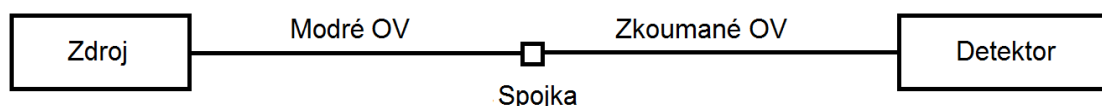
4.1 Zadání:

- 1) Změřte přenášený výkon optickým vláknem při různém průměru ohnutí a změřené hodnoty srovnajte s výkonem přímého optického vlákna.
- 2) Změřte přenášený výkon optickým vláknem při zatížení destiček pomocí závaží.
- 3) Změřte přenášený výkon optickým vláknem při zatížení destiček pomocí siloměru.
- 4) Všechny změřené hodnoty vyhodnoťte graficky.

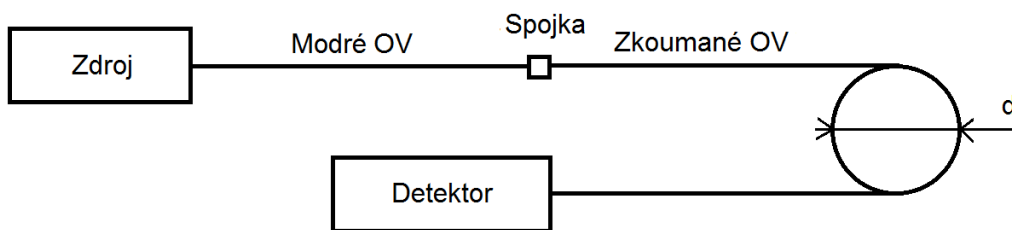
4.2 Použité měřicí přístroje:

- Zdroj: LED LIGHT SOURCE, výrobce: PROMAX, výrobní číslo: PL 810AES010 (viz Obrázek 11 a))
- Detektor: OPTICAL POWER METER, výrobce: THORLABS, výrobní číslo: 11021732 (viz Obrázek 11 b))
- Digitální měřič síly: FG 5000, výrobce: MICRONIX, výrobní číslo: L 620 150 (viz Obrázek 15)
- Modré vlákno (viz Obrázek 12)
- Zkoumané vlákno (viz Obrázek 13)
- Přípravek (viz Obrázek 7)
- Použité závaží (viz Obrázek 14)
- Používané destičky (viz Obrázek 8)

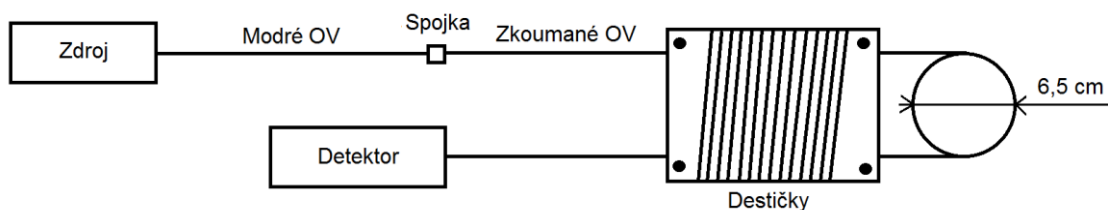
4.3 Schéma zapojení:



Obrázek 19: Schéma zapojení pro měření výkonu při rovném optickém vlákně.

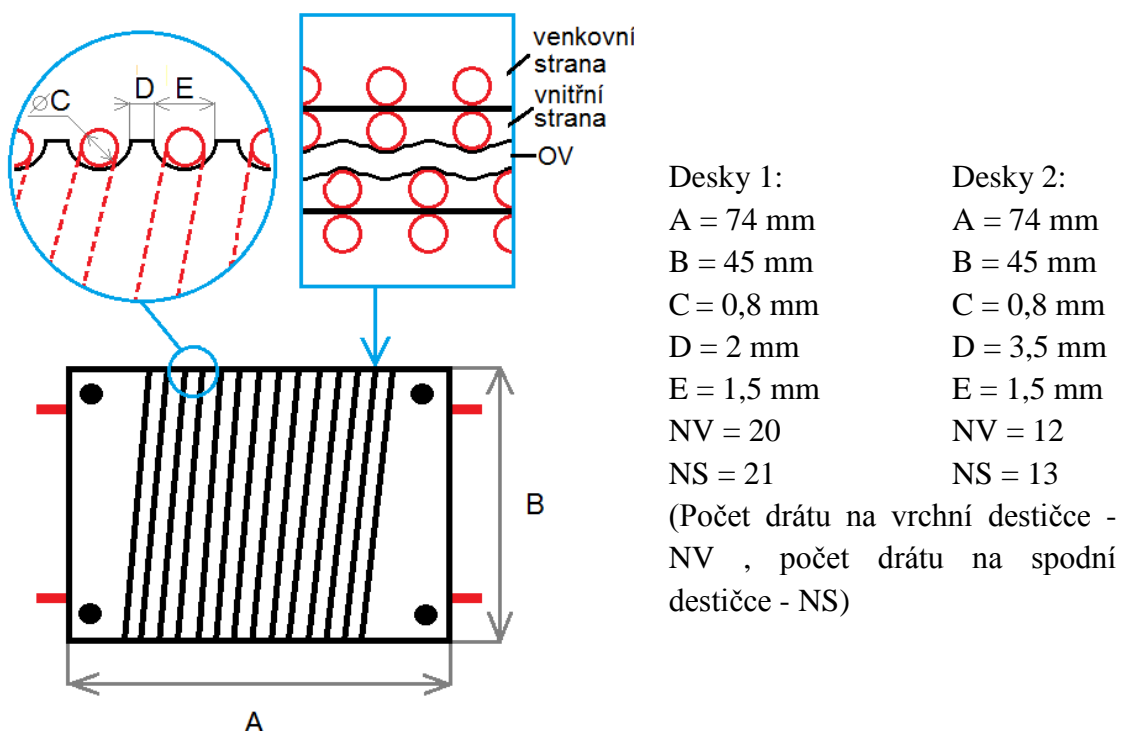


Obrázek 20: Schéma zapojení pro měření výkonu při různém ohnutí optického vlákna.



Obrázek 21: Schéma zapojení pro měření výkonu při ohnutém optickém vlákně.

4.4 Rozměry použitých destiček



Obrázek 22: Zvětšený pohled na okraj a bok použitých destiček

4.5 Teoretická část:

Amplitudové optické vláknové senzory [1, 3,6]

Patří mezi nejrozšířenější typy optických vláknových senzorů. Předností je poměrně jednoduchá konstrukce, používání mnohovidových optických vláken a nízká cena.

Modulace přenášeného optického signálu se u amplitudových optických senzorů provádí:

- Změnou tlumení.
- Změnou přechodu a odrazu světla.
- Změnou vzájemných vazeb světlovou.
- Porušením okrajových podmínek šíření světla v optickém prostředí.

Senzory s porušením okrajových podmínek šíření světla [1, 3,6]

Tyto senzory jsou velmi citlivé a kompaktní. Velkou předností je jednoduché optické schéma. Patří mezi významnou skupinu amplitudových optických vláknových senzorů. Vlivem měřených fyzikálních veličin dochází k porušení okrajových podmínek šíření světla v optickém vlákne (světlovou.). Jednou z nejčastějších porušených podmínek šíření světla je porušení úplného odrazu (jádro-plášť). Pro dvě prostředí s indexy lomu n_1, n_2 platí podmínka úplného odrazu:

$$\Theta_d \geq \sin \frac{n_2}{n_1} \quad (4.1)$$

Kde n_1 je index lomu prostředí ve kterém se šíří světlo,

Θ_d úhel dopadu.

Z tohoto vztahu (4.1) vyplývá, že k porušení okrajových podmínek dojde při změně geometrie (zakřivení) vlnovodu (mění se úhel dopadu), při změně poměru jednotlivých indexů lomu.

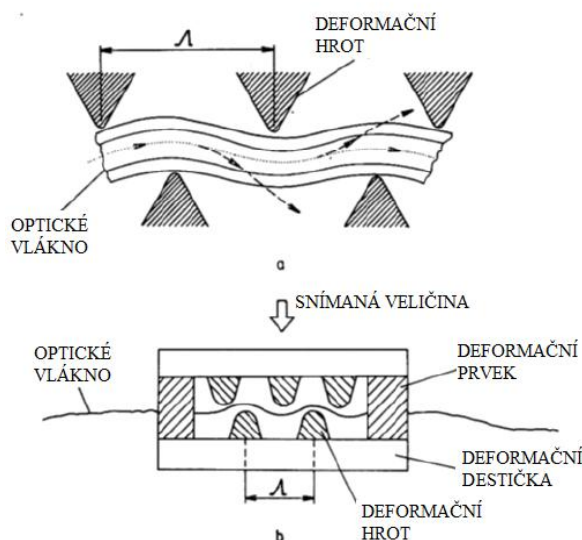
Skupina senzorů využívající k porušení okrajových podmínek šíření světla změnou geometrie, pracují na principu mikroohybových optických vláken.

Kritický poloměr [6]

$$R_c = \frac{3 * n_1 * \lambda}{4 * \pi \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)^3}} \quad (4.2)$$

Kde n_1, n_2 je index lomu jádra (plášť) optického vlákna,

λ vlnová délka světla.



Obrázek 23: Mikroohybový optický vláknový senzor a) ukázka přechodu vedeného světla mimo jádro vlákna b) princip práce mikroohybového optického vláknového senzoru [6]

Kritický poloměr vzniká při ohybu optického vlákna. Pokud optické vlákno ohneme pod kritickým úhlem, nastane pro vidy vyšších řádů porušení okrajových podmínek (viz Obrázek 13 a)). To znamená, že tyto vidy se odrazí na rozhraní jádro-plášť do pláště a budou vedeny pláštěm (plášťové vidy), nebo uniknou do okolního prostředí. V důsledku poklesu přenášených vidů dojde k poklesu intenzity světla přenášeného jádrem optického vlákna. V senzorech využívající mikroohyby se měří pokles intenzity vystupujícího světla z konce jádra, nebo nárůst intenzity světla, který uniká přes plášť do okolního prostředí.

4.6 Postup měření:

- Zapojte schéma zapojení z Obrázku 19. Na zdroji nastavte 850 nm a změřte přenášený výkon. Zkoumané optické vlákno ohněte okolo válečků s průměrem $d = 1,8; 2,8; 3,8; 4,8$ a $6,5$ cm. Pro každý průměr změřte přenášený výkon (schéma zapojení na Obrázku 20). Změřené hodnoty vyhodnoťte v jednom grafu.
- Zapojte schéma zapojení z Obrázku 21. Destičky 11/1 vložte do přípravku tak aby přípravek působil na střed destiček. Vlákno ohněte přes váleček o průměru $6,5$ cm. Dále vložte zkoumané vlákno na dvakrát mezi destičky 11/1. Na zdroji ponechte nastavené 850 nm z minulého měření. Změřte přenášený výkon bez zatížení. Následně postupně měňte závaží na závěsném systému přípravku v intervalu od 200 g až 1700 g tak, abyste pro daný interval změřili deset hodnot výkonu. Po přidání závaží ponechte hodnotu přenášeného výkonu dostatečně

ustálit. Stejný postup zopakujte i pro destičky 11/2. Změřené charakteristiky pro destičky 11/1 a 11/2 vyhodnoťte v jednom grafu.

- Ponechte stejné zapojení, jako bylo v úkolu 2, pouze vyměňte na přípravku závěsný systém za siloměr. Na zdroji ponechte nastavené 850 nm a použijte destičky 11/1. Nejdříve změřte hodnotu přenášeného výkonu bez zatížení. Následně měřte přenášený výkon pro deset hodnot zatížení pomocí siloměru z intervalu 0-5000 g. Stejný postup aplikujte i pro destičky 11/2. Změřené charakteristiky pro destičky 11/1 a 11/2 vyhodnoťte v jednom grafu. Změřené výsledky z úkolu tři porovnejte se zjištěnými hodnotami s úkolu 2.

5 ZÁVĚR

Měřením jsem zjistil, že optické vlákno je lepší vést přes destičky dvakrát. U zapojení, kdy je vlákno vedeno jen jednou přes destičky nebylo možné optické vlákno umístit do středu destiček skrz utahovací šrouby. Umístění vlákna mimo střed destiček způsobovalo, že vrchní destička se opírala nejen o vlákno ale i o stabilizační hroty a tím se změřené hodnoty zkreslily. Změřené hodnoty výkonů pro rovné vlákno jdou vidět v Tabulce 2 a hodnoty ohnutého vlákna v Tabulce 3.

Provedl jsem měření pro zjištění vlivu velikosti poloměru válečku (váleček, okolo něhož se vlákno ohýbalo) na přenášený výkon vláknem. Měření pro každý poloměr bylo provedeno desetkrát a následně vypočítaná průměrná hodnota. Změřené a vypočítané hodnoty jsou v Tabulce 5. Zjistil jsem, že s rostoucím poloměrem válečku se zmenšuje rozdíl od přenášeného výkonu rovného vlákna do doby, kdy se vlivem velikosti ohybu projevil útlum ohybu vlákna na straně destiček. Průměrná hodnota změřeného výkonu rovného vlákna je 213,03 μW . Nejblíže k této hodnotě měla průměrná hodnota 211,00 μW válečku o průměru 6,5 cm. Pro další měření jsem zvolil průměr válce 6,5 cm. Závislost přenášeného výkonu na velikosti průměru válečku jde vidět na Grafu 2.

Při zkoumání paměti vlákna jsem zjistil, že s rostoucí velikostí zatížení a průměrem hrotů roste i potřebný čas pro návrat výkonu na původní hodnotu před zatížením. Tato skutečnost se promítla v rychlosti opakování měření v dalších experimentech. Při použití destiček s menším počtem hrotů (destičky 2) jsem změřil větší časy než u destiček 1. Změřené hodnoty jsou v Tabulce 6 a Tabulce 7.

Z měřených hodnot výkonů při použití závaží byly vypočítané průměrné hodnoty výkonu Pp1 (průměr drátu 0,1 mm), Pp2 (průměr drátu 0,5 mm) a Pp3 (průměr drátu 0,8 mm) pro destičky 1, které jsou vidět v Tabulce 8. Pro destičky 2 jsou výkony Pp4 (průměr drátu 0,1 mm), Pp5 (průměr drátu 0,5 mm) a Pp6 (průměr drátu 0,8 mm) vidět v Tabulce 9. Porovnání hodnot výkonů pro různou hustotu a velikost deformačních hrotů je na Grafu 5, 6, 7, 8, 9.

Z měřených hodnot výkonů při použití siloměru byly vypočítané průměrné hodnoty výkonu Pp1 (průměr drátu 0,1 mm), Pp2 (průměr drátu 0,5 mm) a Pp3 (průměr drátu 0,8 mm) pro destičky 1, které jsou vidět v Tabulce 10. Pro destičky 2 jsou výkony Pp4 (průměr drátu 0,1 mm), Pp5 (průměr drátu 0,5 mm) a Pp6 (průměr drátu 0,8 mm) vidět v Tabulce 11. Porovnání hodnot výkonů pro různou hustotu a velikost deformačních hrotů je na Grafu 10, 11, 12, 13, 14.

Z měřených hodnot výšky hladiny byly vypočítané průměrné hodnoty výkonu Pp1 (průměr drátu 0,1 mm), Pp2 (průměr drátu 0,5 mm) a Pp3 (průměr drátu 0,8 mm) pro destičky 1, které jsou vidět v Tabulce 12. Pro destičky 2 jsou výkony Pp4 (průměr drátu 0,1 mm), Pp5 (průměr drátu 0,5 mm) a Pp6 (průměr drátu 0,8 mm) v Tabulce 13. Porovnání hodnot výkonů pro různou hustotu a velikost deformačních hrotů je zobrazeno na Grafu 15, 16, 17, 18, 19.

Z provedených měření jsem vytvořil zadání laboratorní úlohy do předmětu MOES. Návrh zadání úlohy jde vidět v kapitole 4.

Nejistota měření použitých přístrojů uvedená v dokumentaci přístrojů je následující: detektor $\pm (5 \%)$, siloměr $\pm (0,4 \% + 1 \text{ dig})$, zdroj $\pm (0,1 \text{ dB})$.

Do budoucna by bylo možné rozšířit měření výšky hladiny vyrobením většího držáku pro umístění větší kádinky na vodu.

Literatura

- [1] KROHN, D. A. *Fiber Optic Sensors, Fundamentals and Application. Third Edition*, The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2000. ISBN 1-55617-714-3
- [2] BERTHOLD, J. W. *Historical Review of Microbend Fiber-Optic Sensors*. Journal of Lightwave Technology, 1995, ročník 13, č. 7.
- [3] TURAN, J.: *Optické vláknové senzory*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1991. 250 s. ISBN 80-05-00655-1
- [4] ĎAĎO, S., KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [5] MARŠÁLEK, L. *Optická vlákna*. Skripta VŠB Ostrava, 2006.
- [6] BEJČEK, L. *Optoelektronické snímače*. Skripta VUT Brno, 2009.
- [7] ŠEDIVÁ, S. *Laboratorní cvičení z Vláknové optiky v automatizaci*. 1. Skripta VUT Brno, 2010.
- [8] SCHLITTER, P. *Přednášky z optických vláken a práce s nimi*[online]. [cit. 2013-02-01] Dostupné z: <http://www.comtel.cz/files/download.php?id=310>
- [9] PROMAX. *PROLITE-80/81* [online]. [cit. 2013-05-10] Dostupné z: http://www.promaxprolink.com/pdf/prolite80_81_90.pdf
- [10] THORLABS. *PM20* [online]. [cit. 2013-05-10] Dostupné z: <http://www.thorlabs.de/thorProduct.cfm?partNumber=PM20C>
- [11] MICRONIX. *Měřiče tahové a tlakové síly* [online]. [cit. 2013-05-10] Dostupné z: <http://eshop.micronix.cz/data/cz/att/002/1215-1863.pdf>
- [12] PANDEY, N. K., YADAV, B. C. *Embedded fibre optic microbend sensor for measurement of high pressure and crack detection*. Sensors and Actuators, 2006, č. 128, s. 33-36.
- [13] KERSEY, A. D., DANDRIDGE, A. *Applications of Fiber Optic Sensors*. Ieee transactions on components, hybrids, and manufacturing technology, 1990, ročník 13, č. 1, s. 137-143.
- [14] LAGAKOS, N., COLE, J. H., BUCARO, J. A. *Microbend fiber optic sensor*. Applied optics, 1987, ročník 26, č. 11, s. 2171-2180.

Seznam příloh

Příloha 1. Tabulky experimentálního měření pro zkoumání vlivu velikosti zátěže na přenášený výkon- závaží.

Příloha 2. Tabulky experimentálního měření pro zkoumání vlivu velikosti zátěže na přenášený výkon- siloměr.

Příloha 3. Tabulky experimentálního měření pro zkoumání vlivu výšky hladiny v nádobě na přenášený výkon.

Příloha 4. CD/DVD

Příloha 1

Tabulka 14: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí závaží (desky 1 s drátem d= 0,1 mm)

m	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp1
[g]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,0	210,9	210,9	211,1	211,1	211,0	210,9	211,0	211,1	210,9	211,0
200	210,9	210,9	210,9	210,9	211,0	210,9	211,1	210,9	211,0	210,9	210,9
400	210,7	210,7	210,8	210,7	210,8	210,6	210,9	210,7	210,7	210,6	210,7
500	210,6	210,6	210,6	210,6	210,4	210,6	210,7	210,5	210,5	210,6	210,6
600	210,5	210,5	210,5	210,5	210,4	210,5	210,6	210,3	210,5	210,4	210,5
700	210,3	210,4	210,3	210,4	210,3	210,4	210,3	210,2	210,4	210,3	210,3
800	210,1	210,0	210,2	210,1	210,1	210,3	210,2	210,1	210,2	210,0	210,1
900	209,9	209,9	209,8	209,8	209,8	209,7	209,6	209,9	209,8	209,7	209,8
1000	209,7	209,7	209,7	209,6	209,5	209,6	209,4	209,7	209,6	209,5	209,6
1100	209,4	209,6	209,3	209,4	209,3	209,4	209,2	209,5	209,3	209,2	209,4
1200	209,2	209,0	209,2	209,1	209,3	209,2	209,0	209,3	209,0	208,9	209,1
1300	208,9	208,7	208,8	208,7	208,7	208,9	208,9	208,8	208,9	208,9	208,8
1500	208,8	208,5	208,6	208,6	208,8	208,7	208,7	208,6	208,7	208,8	208,7
1700	208,7	208,6	208,6	208,6	208,7	208,6	208,6	208,5	208,5	208,7	208,6

Tabulka 15: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí závaží (desky 1 s drátem d= 0,5 mm)

m	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp2
[g]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8
200	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3
400	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1
500	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9
600	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8
700	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6
800	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5
900	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4
1000	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3
1100	209,1	209,1	209,1	209,0	209,1	209,1	209,0	209,0	209,1	209,1	209,1
1200	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9
1300	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7
1500	208,6	208,6	208,6	208,6	208,6	208,6	208,6	208,6	208,6	208,6	208,6
1700	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5

Tabulka 16: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí závaží (desky 1 s drátem d= 0,8 mm)

m	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp3
[g]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3
200	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0
400	209,8	209,7	209,7	209,7	209,8	209,7	209,7	209,8	209,7	209,8	209,7
500	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3	209,3
600	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1
700	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8
800	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5	208,5
900	208,2	208,2	208,2	208,2	208,2	208,2	208,2	208,2	208,2	208,2	208,2
1000	208,0	208,0	208,0	208,0	208,0	208,0	208,0	208,0	208,0	208,0	208,0
1100	207,9	207,9	207,9	207,8	207,9	207,9	207,8	207,9	207,9	207,8	207,9
1200	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6
1300	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4
1500	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1
1700	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6

Tabulka 17: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí závaží (desky 2 s drátem d= 0,1 mm)

m	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp4
[g]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,0	211,1	210,9	211,0	211,0	211,2	211,0	211,1	210,9	211,2	211,0
200	210,8	211,0	210,8	210,9	210,8	210,8	210,9	210,8	210,7	210,9	210,8
400	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4
500	210,0	210,0	210,0	210,1	210,0	210,1	210,0	210,1	210,0	210,0	210,0
600	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9
700	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8
800	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4
900	209,0	209,1	209,0	209,1	209,0	209,0	209,0	209,0	209,0	209,0	209,0
1000	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9	208,9
1100	208,1	208,1	208,1	208,1	208,1	208,1	208,1	208,1	208,1	208,1	208,1
1200	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9
1300	206,8	206,8	206,8	206,8	206,8	206,8	206,8	206,8	206,8	206,8	206,8
1500	205,9	206,0	205,9	206,0	206,0	206,0	206,0	205,9	206,0	206,0	206,0
1700	205,3	205,3	205,3	205,2	205,3	205,3	205,3	205,2	205,3	205,3	205,3

Tabulka 18: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí závaží (desky 2 s drátem d= 0,5 mm)

m	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp5
[g]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	210,8	210,7	210,7	210,8	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,8	210,7
200	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3
400	210,0	209,9	210,0	209,9	210,0	210,0	210,0	210,0	209,9	209,9	210,0
500	209,9	209,8	209,9	209,8	209,8	209,8	209,9	209,8	209,8	209,8	209,8
600	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6
700	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4
800	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1
900	208,9	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,9	208,8	208,8
1000	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3
1100	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9
1200	207,5	207,5	207,5	207,5	207,5	207,5	207,5	207,5	207,5	207,5	207,5
1300	206,7	206,7	206,7	206,7	206,7	206,7	206,7	206,7	206,7	206,7	206,7
1500	205,5	205,5	205,5	205,5	205,5	205,5	205,5	205,5	205,5	205,5	205,5
1700	204,8	204,8	204,8	204,8	204,8	204,8	204,8	204,8	204,8	204,8	204,8

Tabulka 19: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí závaží (desky 2 s drátem d= 0,8 mm)

m	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp6
[g]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3
200	209,8	209,8	209,8	209,8	209,8	209,9	209,8	209,8	209,8	209,9	209,8
400	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,6	209,5	209,6	209,5	209,5	209,5
500	209,2	209,3	209,2	209,2	209,2	209,2	209,2	209,2	209,2	209,2	209,2
600	209,0	209,0	209,0	209,0	209,0	209,0	209,1	209,0	209,0	209,1	209,0
700	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7
800	208,4	208,4	208,4	208,4	208,4	208,4	208,4	208,4	208,4	208,4	208,4
900	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9
1000	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6
1100	207,2	207,2	207,2	207,2	207,2	207,2	207,2	207,2	207,2	207,2	207,2
1200	206,9	206,9	206,9	206,9	206,9	206,9	206,9	206,9	206,9	206,9	206,9
1300	206,3	206,3	206,3	206,3	206,3	206,3	206,3	206,3	206,3	206,3	206,3
1500	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2
1700	204,2	204,2	204,2	204,2	204,2	204,2	204,2	204,2	204,2	204,2	204,2

Příloha 2

Tabulka 20: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí siloměru (desky 1 s drátem d= 0,1 mm)

m	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp1
[g]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9
500	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7
800	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7
900	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7
1000	210,6	210,6	210,6	210,6	210,6	210,6	210,6	210,6	210,6	210,6	210,6
1200	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5
1600	210,4	210,3	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,3	210,3	210,3	210,3
2000	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3
2300	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1
2500	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9	209,9
2700	209,5	209,5	209,5	209,4	209,5	209,5	209,4	209,5	209,5	209,5	209,5
2900	209,0	208,9	208,9	209,0	209,0	209,0	209,0	209,0	208,9	209,0	208,9
3100	208,7	208,6	208,7	208,7	208,7	208,7	208,6	208,6	208,7	208,7	208,6
3400	208,1	208,0	208,1	208,1	208,1	208,1	208,1	208,1	208,1	208,1	208,1
3700	207,8	207,8	207,8	207,8	207,8	207,8	207,8	207,8	207,8	207,8	207,8
4000	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4	207,4
4100	206,9	206,9	206,9	206,9	206,9	206,9	206,9	206,8	206,9	206,8	206,9
4300	206,0	206,1	206,1	206,0	206,0	206,0	206,1	206,0	206,1	206,1	206,0
4500	204,5	204,6	204,5	204,5	204,5	204,5	204,5	204,5	204,5	204,5	204,5
4600	203,2	203,1	203,2	203,1	203,2	203,1	203,1	203,2	203,1	203,1	203,1
4700	202,6	202,6	202,6	202,6	202,6	202,6	202,6	202,6	202,6	202,6	202,6
4800	200,1	200,1	200,1	200,1	200,1	200,2	200,2	200,1	200,1	200,1	200,1
4900	199,0	199,1	199,0	199,1	199,0	199,1	199,1	199,1	199,1	199,1	199,1

Tabulka 21: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí siloměru (desky 1 s drátem d= 0,5 mm)

m	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp2
[g]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6
500	210,8	210,9	210,7	210,8	211,0	210,8	210,9	210,8	211,4	210,9	210,9
800	210,6	210,6	210,5	210,6	210,5	210,5	210,6	210,5	210,5	210,6	210,5
900	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5
1000	210,3	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4
1200	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3	210,3
1600	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1
2000	210,0	210,0	210,0	210,0	209,9	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0	210,0
2300	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4	209,4
2500	209,2	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1
2700	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8	208,8
2900	208,3	208,4	208,3	208,3	208,4	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3
3100	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6
3400	206,5	206,5	206,5	206,5	206,5	206,5	206,5	206,5	206,5	206,5	206,5
3700	205,2	205,1	205,1	205,1	205,1	205,1	205,1	205,1	205,1	205,1	205,1
4000	204,0	203,9	203,9	203,9	203,9	203,9	203,9	203,9	203,9	203,9	203,9
4100	202,8	202,8	202,8	202,8	202,8	202,8	202,8	202,8	202,8	202,8	202,8
4300	202,4	202,4	202,4	202,4	202,4	202,4	202,4	202,4	202,4	202,4	202,4
4500	200,1	200,1	200,1	200,1	200,1	200,1	200,1	200,1	200,1	200,1	200,1
4600	199,8	199,7	199,7	199,7	199,7	199,7	199,7	199,7	199,7	199,7	199,7
4700	199,4	199,4	199,4	199,4	199,4	199,5	199,3	199,4	199,6	199,5	199,4
4800	198,5	198,1	198,1	198,0	198,1	198,1	198,1	198,2	198,0	198,2	198,1
4900	197,4	197,0	197,3	197,5	197,5	197,4	197,3	197,4	197,4	197,4	197,4

Tabulka 22: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí siloměru (desky 1 s drátem d= 0,8 mm)

m	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp3
[g]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3
500	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5
800	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3	208,3
900	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1	207,1
1000	207,0	207,1	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0	207,0
1200	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6	206,6
1600	205,8	205,8	205,8	205,8	205,8	205,8	205,8	205,8	205,8	205,8	205,8
2000	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2	205,2
2300	204,3	204,3	204,3	204,3	204,3	204,3	204,3	204,3	204,3	204,3	204,3
2500	203,7	203,7	203,8	203,7	203,8	203,7	203,7	203,7	203,7	203,8	203,7
2700	203,4	203,4	203,4	203,4	203,4	203,4	203,4	203,4	203,4	203,4	203,4
2900	202,3	202,3	202,3	202,3	202,3	202,3	202,3	202,3	202,3	202,3	202,3
3100	201,8	201,9	201,9	201,9	201,9	201,9	201,9	201,9	202,0	201,9	201,9
3400	201,5	201,5	201,5	201,6	201,5	201,5	201,5	201,5	201,5	201,6	201,5
3700	201,1	201,1	201,1	201,1	201,1	201,1	201,1	201,1	201,1	201,1	201,1
4000	200,0	199,9	199,9	200,0	199,9	200,0	199,9	199,9	199,9	199,9	199,9
4100	199,8	199,8	199,8	199,8	199,8	199,8	199,8	199,8	199,8	199,8	199,8
4300	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7	198,7
4500	197,9	197,9	197,9	197,9	197,9	197,9	198,0	197,9	197,9	197,9	197,9
4600	197,5	197,4	197,4	197,4	197,4	197,4	197,4	197,4	197,4	197,5	197,4
4700	197,3	197,3	197,3	197,3	197,3	197,3	197,3	197,3	197,3	197,3	197,3
4800	197,1	197,0	197,1	197,0	197,0	197,0	197,1	197,0	197,0	197,0	197,0
4900	196,2	196,2	196,2	196,2	196,2	196,2	196,2	196,2	196,2	196,2	196,2

Tabulka 23: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí siloměru (desky 2 s drátem d= 0,1 mm)

m	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp4
[g]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1
500	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9
800	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9
900	210,6	210,5	210,6	210,6	210,5	210,6	210,6	210,5	210,5	210,5	210,5
1000	210,2	210,2	210,2	210,2	210,3	210,3	210,2	210,2	210,2	210,3	210,2
1200	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1	210,1
1600	209,7	209,8	209,7	209,7	209,8	209,8	209,7	209,7	209,7	209,7	209,7
2000	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9
2300	205,1	205,1	205,1	205,1	205,1	205,1	205,1	205,1	205,1	205,1	205,1
2500	203,5	203,5	203,5	203,5	203,5	203,5	203,5	203,5	203,5	203,5	203,5
2700	199,6	199,7	199,6	199,6	199,6	199,7	199,6	199,6	199,6	199,7	199,6
2900	195,5	195,5	195,5	195,5	195,5	195,5	195,5	195,5	195,5	195,5	195,5
3100	191,9	191,9	191,9	191,9	191,9	191,9	191,9	191,9	191,9	191,9	191,9
3400	190,3	190,3	190,3	190,3	190,3	190,3	190,3	190,3	190,3	190,3	190,3
3700	188,5	188,5	188,5	188,4	188,5	188,5	188,5	188,5	188,5	188,5	188,5
4000	187,7	187,6	187,6	187,7	187,7	187,6	187,7	187,6	187,7	187,6	187,6
4100	187,1	187,1	187,1	187,1	187,1	187,1	187,1	187,1	187,1	187,1	187,1
4300	186,9	186,9	186,9	186,9	186,9	186,9	186,9	186,9	186,9	186,9	186,9
4500	186,5	186,5	186,5	186,5	186,5	186,5	186,5	186,5	186,5	186,5	186,5
4600	184,7	184,7	184,7	184,7	184,7	184,7	184,7	184,7	184,7	184,7	184,7
4700	180,0	180,0	180,1	180,1	180,1	180,0	180,1	180,0	180,0	180,0	180,0
4800	179,6	179,6	179,6	179,6	179,6	179,6	179,6	179,5	179,5	179,6	179,6
4900	176,2	176,3	176,2	176,2	176,2	176,2	176,2	176,2	176,2	176,2	176,2

Tabulka 24: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí siloměru (desky 2 s drátem d= 0,5 mm)

m	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp5
[g]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3
500	210,5	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,4	210,5	210,4
800	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,6	209,7	209,6
900	209,1	209,1	209,1	209,2	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1
1000	208,6	208,6	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7	208,7
1200	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	207,9	208,0	207,9	207,9	207,9	207,9
1600	206,4	206,4	206,5	206,5	206,5	206,4	206,4	206,4	206,4	206,4	206,4
2000	204,7	204,7	204,7	204,7	204,7	204,7	204,7	204,7	204,7	204,7	204,7
2300	201,9	201,9	201,8	201,9	201,8	201,8	201,9	201,8	201,8	201,9	201,8
2500	196,4	196,4	196,4	196,4	196,4	196,4	196,4	196,4	196,4	196,4	196,4
2700	194,9	195,0	194,9	194,9	194,9	194,9	194,9	195,0	194,9	195,0	194,9
2900	192,7	192,6	192,6	192,6	192,6	192,7	192,6	192,7	192,6	192,6	192,6
3100	188,1	188,0	188,1	188,1	188,0	188,0	188,1	188,1	188,0	188,0	188,0
3400	184,3	184,3	184,4	184,3	184,3	184,3	184,4	184,3	184,4	184,3	184,3
3700	180,9	181,0	180,9	181,0	180,9	181,0	180,9	180,9	181,0	181,0	180,9
4000	175,1	175,1	175,1	175,1	175,1	175,1	175,1	175,1	175,1	175,2	175,1
4100	171,8	171,9	171,8	171,8	171,8	171,8	171,8	171,8	171,8	171,9	171,8
4300	163,8	163,8	163,7	163,8	163,7	163,8	163,8	163,8	163,8	163,8	163,8
4500	162,6	162,6	162,6	162,6	162,7	162,7	162,6	162,7	162,7	162,7	162,6
4600	162,1	162,2	162,1	162,1	162,1	162,1	162,1	162,1	162,1	162,1	162,1
4700	160,0	160,1	160,1	161,0	160,1	160,0	160,1	160,0	160,1	160,0	160,1
4800	157,6	157,7	157,7	157,6	157,6	157,6	157,6	157,7	157,6	157,6	157,6
4900	154,5	154,5	154,5	154,5	154,5	154,5	154,5	154,5	154,5	154,5	154,5

Tabulka 25: Změřené hodnoty výkonu pro různé zatížení pomocí siloměru (desky 2 s drátem d= 0,8 mm)

m	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp6
[g]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,4	211,4	211,4	211,4	211,4	211,4	211,4	211,4	211,4	211,4	211,4
500	210,5	210,2	210,7	210,6	210,5	210,6	210,6	210,6	210,5	210,6	210,5
800	209,5	209,8	209,2	209,5	209,6	209,5	209,5	209,5	209,6	209,6	209,5
900	209,1	209,1	209,0	209,1	209,1	209,1	209,1	209,1	209,3	209,2	209,1
1000	208,6	208,8	208,3	208,6	208,6	208,6	208,6	208,6	208,1	207,9	208,5
1200	207,3	207,3	206,0	207,3	207,3	207,3	207,3	207,3	207,4	207,1	207,2
1600	204,9	205,3	203,4	204,9	205,0	204,9	204,9	204,9	204,6	205,0	204,8
2000	201,7	202,1	201,0	201,7	201,8	201,7	201,7	201,7	201,5	201,7	201,7
2300	199,6	187,0	189,1	199,6	199,6	199,6	199,7	200,0	199,7	197,6	197,2
2500	184,0	182,1	182,8	184,3	184,1	184,1	184,0	184,4	184,6	185,5	184,0
2700	180,0	180,1	178,9	180,8	180,0	180,5	180,0	180,4	180,4	181,0	180,2
2900	177,0	178,0	174,7	175,7	177,0	177,1	177,0	177,9	177,1	173,9	176,5
3100	172,4	175,7	171,2	172,4	172,4	172,4	172,4	172,5	172,5	171,6	172,5
3400	166,9	169,7	160,4	166,9	166,9	166,9	166,9	166,9	166,3	165,4	166,3
3700	160,1	165,3	159,4	160,1	160,1	160,1	160,1	160,1	160,1	160,8	160,6
4000	148,1	147,0	145,9	148,1	148,1	148,1	148,1	148,2	148,0	147,2	147,7
4100	144,8	143,3	141,4	144,8	144,8	144,9	144,8	144,8	144,7	144,5	144,3
4300	138,5	140,2	136,2	138,5	138,6	138,5	138,5	138,5	138,6	138,2	138,4
4500	133,6	138,4	133,8	133,7	133,6	133,7	133,6	133,7	133,5	133,2	134,1
4600	132,9	134,9	132,9	132,9	132,9	132,9	132,9	132,9	132,9	132,5	133,1
4700	132,4	132,4	132,8	132,4	132,5	132,5	132,4	132,4	132,4	132,1	132,4
4800	131,2	131,9	131,3	131,2	131,2	131,2	131,2	131,2	131,2	131,7	131,3
4900	130,7	131,4	130,2	130,7	130,8	130,5	130,7	130,8	130,3	130,9	130,7

Příloha 3

Tabulka 26: Změřené hodnoty výkonu pro různou výšku hladiny (desky 1 s drátem d= 0,1 mm)

h	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp1
[mm]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,8	211,8	211,8	211,8	211,8	211,8	211,8	211,8	211,8	211,8	211,8
20	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7
35	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7
50	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7	211,7
65	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6
80	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6

Tabulka 27: Změřené hodnoty výkonu pro různou výšku hladiny (desky 1 s drátem d= 0,5 mm)

h	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp2
[mm]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5
20	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3
35	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2
50	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2
65	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1
80	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0

Tabulka 28: Změřené hodnoty výkonu pro různou výšku hladiny (desky 1 s drátem d= 0,8 mm)

h	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp3
[mm]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1
20	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1
35	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0
50	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9
65	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9
80	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8

Tabulka 29: Změřené hodnoty výkonu pro různou výšku hladiny (desky 2 s drátem d= 0,1 mm)

h	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp4
[mm]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6
20	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6
35	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6
50	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6	211,6
65	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5
80	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5	211,5

Tabulka 30: Změřené hodnoty výkonu pro různou výšku hladiny (desky 2 s drátem d= 0,5 mm)

h	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp5
[mm]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3	211,3
20	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2
35	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2	211,2
50	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1
65	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1
80	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0

Tabulka 31: Změřené hodnoty výkonu pro různou výšku hladiny (desky 2 s drátem d= 0,8 mm)

h	P₁	P₂	P₃	P₄	P₅	P₆	P₇	P₈	P₉	P₁₀	Pp6
[mm]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]	[μW]
0	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1	211,1
20	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0
35	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9	210,9
50	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8	210,8
65	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7
80	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5	210,5