



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NAPÁJECÍ ZDROJ POWER-OVER-FIBER

POWER-OVER-FIBER POWER SUPPLY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Kos

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**
Ústav radioelektroniky

Student: Bc. David Kos

ID: 154771

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Napájecí zdroj Power-Over-Fiber

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte principy a použití optických vláken a zdroje záření vhodných pro jejich buzení. Seznamte se s koncepty přenosu energie optickým vláknem a její následné konverzi pro napájení elektronických zařízení. Proveďte rešerši existujících řešení a uveďte dosahované parametry přenášeného výkonu. Navrhněte vlastní řešení experimentálního systému vzdáleného napájení elektronických zařízení přes optické vlákno.

Pro navržené řešení vzdáleného napájení elektronických zařízení optickým vláknem vyberte vhodné komponenty s ohledem na vysokou účinnost zařízení. Navržený systém realizujte a měřeními zjistěte jeho parametry přenášeného výkonu, výkonové stability a celkové účinnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DVORKÝ, P. Měřicí modul napájený po optickém vlákně. Diplomová práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, 2011.

[2] HOFFART, F. Maximum Power Point Control Simplifies Energy Harvesting. Linear Technology Solutions, 2010. [cit. 16. 5. 2016] Dostupné z: <http://www.linear.com/solutions/1049>

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 17.5.2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
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 práce se zabývá možnostmi přenosu energie optickým vláknem pro účely napájení elektronických zařízení. Zahrnuje problematiku přeměny elektrické energie na optickou, navázáním optického záření do optického vlákna, vazbou mezi vláknem a opto-elektrickým převodníkem, přeměnou optické energie na elektrickou a její následné transformaci na potřebné napěťové úrovně. Práce v první části pojednává o principu zmíněného napájecího systému (Power-Over-Fiber). Jsou uvedeny různé technologie provedení klíčových částí zdroje a diskutována jejich efektivita. V další části práce je porovnáno několik komerčních zařízení Power-Over-Fiber. Následně jsou navrženy experimentální systémy s využitím polovodičového laseru, mnohovidového vlákna, fotovoltaického článku a příslušných elektronických obvodů. Závěrečná část práce se věnuje konstrukci experimentálních systémů a měření parametrů přenášeného výkonu a účinnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Optické vlákno, elektrická energie, optická energie, polovodičový laser, mnohovidové vlákno, fotovoltaický článek.

ABSTRACT

This thesis deals with the possibilities of energy transmission by optical fiber for the purpose of powering of electronic systems. It comprises issues of electrical energy conversion to optical energy, coupling the power into the optical fiber, coupling between fiber and opto-electric transducer, conversion of optical energy to electrical energy, and transformation on required voltage levels. The principles of such Power-Over-Fiber are discussed in the first part of the work. Various technologies for the implementation of key system parts and their effectivity are discussed. In the next part, several Power-Over-Fiber commercial devices are compared. Subsequently, systems for Power-Over-Fiber experimental implementations are proposed. They are based on the utilization of semiconductor laser, multimode fiber, photovoltaic cell and related electronic circuits. The final part of the thesis deals with the construction of experimental systems and measurement of parameters of transmitted power and efficiency.

KEYWORDS

Optical fiber, electrical energy, optical energy, semiconductor laser, multimode fiber, photovoltaic cell.

KOS, D. *Napájecí zdroj Power-Over-Fiber*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2018. 66 s., 24 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Napájecí zdroj Power-Over-Fiber 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Drexlerovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

Úvod	1
1 Princip zdroje Power-over-Fiber	3
2 Hlavní části zdroje PoF	7
2.1 Optický vlnovod	7
2.1.1 Mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu.....	9
2.1.2 Mnohovidová gradientní vlákna	9
2.1.3 Jednovidová vlákna.....	10
2.1.4 Numerická apertura.....	10
2.1.5 Útlum	11
2.1.6 Obsah iontů OH –	13
2.1.7 Parametr MDF (Mode Field Diameter)	13
2.2 Optický zdroj	14
2.2.1 Elektroluminiscenční dioda	14
2.2.2 Laserové diody.....	16
2.2.3 Vláknové lasery	19
2.3 Převodník světla na elektrický proud.....	20
2.3.1 Fotodioda	21
2.3.2 Fotovoltaický článek.....	24
2.4 Navázání optického výkonu.....	24
2.5 DC/DC konvertor.....	27
2.5.1 Step-up DC/DC konvertor LTC3105.....	29
2.5.2 Step-up DC/DC konvertor TPS6120x	30
3 Srovnání existujících řešení	31
3.1 RLH Industries Power Over Fiber System	31
3.2 JDSU PPM-5 Photonic Power Module.....	32
3.3 MH GoPower Power over Fiber Platform	32
4 Návrh typického řešení systému PoF	34
4.1 Optický zdroj	34

4.2	Přenosové vlákno	35
4.3	Fotodetektor	35
4.4	Teoretický návrh optické části zdroje PoF	36
5	Návrh experimentálního zdroje PoF	38
5.1	Optický zdroj	38
5.2	Přenosové vlákno	42
5.3	Fotodetektor	45
5.4	Zpracování elektrického výkonu	47
5.5	Shrnutí návrhů.....	49
6	Realizace systému a měření	52
6.1	Ověření funkčnosti proudových zdrojů	52
6.2	První koncepce zdroje PoF	53
6.3	Druhá koncepce zdroje PoF	58
6.4	Třetí koncepce zdroje PoF	59
6.5	Shrnutí a porovnání výsledků měření	62
7	Závěr	65
	Literatura	67
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	70
	Seznam Příloh	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Blokové schéma PoF.	3
Obr. 2: Blokové schéma opticky napájeného sensorového systému. [1]	4
Obr. 3: Způsoby zapojení přijímače PoF, a) s DC/DC konvertorem, b) se step-up konvertorem, c) se sériovými FD a DC/DC konvertorem, d) s paralelními FD a step-up konvertorem. [3]	5
Obr. 4: Přijímač zdroje PoF s nabíjecím kondenzátorem. [3]	6
Obr. 5: Zapojení vysílače PoF se dvěma LD. [5]	6
Obr. 6: Příčný a podélný průřez optického vlákna. [6].....	7
Obr. 7: Lom paprsku od kolmice. [6]	8
Obr. 8: Totální odraz. [7]	8
Obr. 9: Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu. [8]	9
Obr. 10: Mnohovidové gradientní vlákno. [8].....	9
Obr. 11: Jednovidové vlákno. [8]	10
Obr. 12: Navázání paprsku do optického vlákna. [7]	11
Obr. 13: Útlum skleněného optického vlákna. [7].....	12
Obr. 14: Definice MDF. [8]	13
Obr. 15: a) PN přechod, b) Energetický model PN přechodu. [6].....	15
Obr. 16: Energetický model laseru. [6].....	16
Obr. 17: a) Vztah mezi vyzařovacím výkonem a řídicím proudem laseru a LED. [6], b) Spektrální šířka LED a laseru. [10]	17
Obr. 18: a) Laserová dutina FP laseru. [6] b) Struktura DFB laseru. [11]	18
Obr. 19: Konstrukce laserového zdroje.	19
Obr. 20: Princip čerpání aktivního vlákna přes plášť. [12].....	19
Obr. 21: Pláštěm čerpaný vláknový laser. [12].....	20
Obr. 22: Volt-ampérová charakteristika fotodiody. [14]	21
Obr. 23: Energetický model PN fotodiody. [6]	22
Obr. 24: Závislosti citlivosti na vlnové délce nejpoužívanějších materiálů fotodiod. [14]	23
Obr. 25: Uspořádání komerčního FV pole v porovnání s 100 μm vláknem. [3].....	24
Obr. 26: Znárodnění přímého navázání optického záření do optického vlákna. [6].....	25
Obr. 27: Navázání optického výkonu do vlákna pomocí a) spojné čočky, b) systému	

čoček. [15]	26
Obr. 28: Navázání optického výkonu z vlákna na fotodetektor.	27
Obr. 29: Step-up DC/DC konvertor. [16]	28
Obr. 30: Princip funkčnosti step-up DC/DC konvertoru. [16]	28
Obr. 31: Účinnosti a výkonové ztráty konvertoru LTC3105 v závislosti na a) vstupním napětím, b) výstupním proudem. (převzato z katalogového listu: [17])	29
Obr. 32: Účinnosti konvertoru TPS61201 v závislosti na a) vstupním napětím, b) výstupním proudem. (převzato z katalogového listu: [18])	30
Obr. 33: PoF systém od firmy RLH Industries a) vysílač, b) přijímač. [19]	31
Obr. 34: PoF modul JDSU PPM-5. [20]	32
Obr. 35: PoF systém od společnosti MH GoPower. [21]	33
Obr. 36: Závislosti elektrického výkonu dodávaného FV jako funkce vzdálenosti od optického zdroje a) 1 km, b) 20 m.	37
Obr. 37: Laserová dioda ADL-80V03TZ: a) Pouzdro [25], b) Zapojení vývodů [24]... 38	
Obr. 38: Pouzdro a zapojení vývodů 1,4 W LD.	39
Obr. 39: Proudový zdroj s jedním LT3080 a výstupním proudem 0 až 1 A. [26].....	41
Obr. 40: Proudový zdroj se dvěma LT3080 a výstupním proudem 0 až 2 A.	41
Obr. 41: Soustava AČ k navázání výkonu do optického vlákna.	42
Obr. 42: Fotocitlivé plochy FV a) KXOB22-04X3F [33], b) KXOB22-12X1F [34]. ...	46
Obr. 43: Navázání optického výkonu z optického vlákna na FV pole.	46
Obr. 44: Solární nabíječka s LTC3105 a LTC4071. [36]	48
Obr. 45: Blokové schéma první a druhé koncepce experimentálního zdroje PoF.....	50
Obr. 46: Blokové schéma třetí koncepce experimentálního zdroje PoF.....	50
Obr. 47: Přechodový děj při startu 1 A proudového zdroje (ILD = 575 mA, ULD = 1,67 V).....	52
Obr. 48: Přechodový děj při startu 2 A proudového zdroje (ILD = 1,33 A, ULD = 1,7 V).	53
Obr. 49: Optický zaměřovač s asférickými čočkami a manipulátorem.....	54
Obr. 50: Závislost vyzářeného optického výkonu a účinnosti přeměny energie na budícím proudem LD ADL-80V03TZ [24].	55
Obr. 51: Uchycení 105 μm optického vlákna vzhledem k FV poli.	56
Obr. 52: Závislosti elektrického výkonu a účinnosti FV pole na dopadajícím optickém výkonu o vlnové délce 808 nm na FV pole v první koncepci zdroje PoF.....	56
Obr. 53: Závislosti výstupního výkonu a účinnosti na příkonu LD první koncepce experimentálního systému PoF.....	57
Obr. 54: Závislosti výstupního výkonu a účinnosti na příkonu LD druhé koncepce	

experimentálního systému PoF.....	59
Obr. 55: Závislost vyzářeného optického výkonu a účinnosti přeměny energie na budícím proudu 1,4 W LD.....	60
Obr. 56: Závislosti elektrického výkonu a účinnosti FV pole na dopadajícím optickém výkonu o vlnové délce 980 nm na FV pole ve třetí koncepci zdroje PoF.....	61
Obr. 57: Závislosti výstupního výkonu a účinnosti na příkonu LD druhé koncepce experimentálního systému PoF.....	61

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Vlastnosti materiálů některých LED a LD. [6]	15
Tab. 2: Vlastnosti jednotlivých polovodičových materiálů vyráběných fotodiod. [6] ...	22
Tab. 3: Typické parametry používaných optovláknových konektorů. [8].....	26
Tab. 4: Parametry použité k výpočtu přenosové linky zdroje PoF.	36
Tab. 5: Elektrické a optické vlastnosti LD ADL-80V03TZ (TP = 25 °C). [24].....	39
Tab. 6: Elektrické a optické vlastnosti 1,4 W LD (TP = 25 °C).	40
Tab. 7: Vlastnosti optického vlákna AFS105/125Y. [27]	42
Tab. 8 Vlastnosti optického vlákna FT1000EMT. [32].....	45
Tab. 9 Elektrické vlastnosti solárních článků KXOB22-04X3F [33] a KXOB22-12X1F [34].	45
Tab. 10: Teoretická výkonová bilance navržených experimentálních systémů PoF.	51
Tab. 11: Změřené hodnoty první koncepce zdroje PoF.	58
Tab. 12: Změřené hodnoty druhé koncepce zdroje PoF.	59
Tab. 13: Změřené hodnoty třetí koncepce zdroje PoF.	62
Tab. 14: Porovnání očekávaných a změřených účinností.	63
Tab. 15: Očekávané a změřené výstupní výkony experimentálních zdrojů PoF.	63

ÚVOD

Nejčastěji jsou optická vlákna používána v telekomunikacích, jako médium pro přenos světelných paprsků nesoucích informací. Optické vlákno lze však použít i k přenosu světelné energie, kterou je možno převodníkem převést na elektrický výkon ve formě elektrického napětí a proudu. Tímto napětím je možno napájet různé senzory a další elektronické zařízení, které nejsou příliš energeticky náročné. Jednou z významných výhod přenosu energie optickým vláknem je imunita vůči vnějším rušivým elektromagnetickým vlivům, protože vlákno je vyrobeno z nevodivých materiálů. Tato vlastnost dovoluje napájené zařízení umístit do okolí vodičů vysokého napětí, transformátorů a dalších vysokonapěťových zařízení, umístěných například v elektrárnách a rozvodnách. Odpadá tak použití drahých stíněných kabelů, které jsou často nedostačující. Navíc takovéto stíněné kabely mají až několik vrstev stínění a jejich rozměry jsou poměrně značné. Napájení po optickém kabelu tedy dovoluje zmenšit rozměry zařízení a zvýšit odolnost vůči rušení. To vše při zlepšení spolehlivosti. Výhodné je i galvanické oddělení napájeného zařízení. V některých systémech je možné po jednom optickém vlákně převádět data i napájecí energii zároveň. Naopak hlavní nevýhodou napájení po optickém kabelu je fakt, že tato metoda nedosahuje příliš velkých účinností. Velmi záleží na preciznosti navázání energie z laseru do vlákna na vstupu systému a spojení s převodníkem světla na elektrický proud na výstupu. Při špatném spojení se spoj může zahřívat a účinnost navázání klesá. Také velmi záleží na vlastnostech použitých vláken a konektorů. Světlovodné kabely se po cestě nesmí příliš často a prudce ohýbat, jinak dochází k další ztrátě účinnosti. Další limitujícím faktorem je, že po optickém kabelu nelze převádět příliš velké výkony. Navíc díky absorpci světla ve vlákně přenášený výkon klesá s délkou vlákna. Nevýhodou můžou být i vysoké ceny výkonných a stabilních laserových zdrojů.

Cílem práce je provést rešerši problematiky přenosu energie optickým vláknem pro napájení vzdálených elektronických systémů. Bude prezentován základní koncept systému pro přenos energie optickým vláknem. V následujícím rozboru budou analyzovány jednotlivé komponenty systému, jejich parametry a klíčové faktory, které ve výsledku ovlivňují celkovou účinnost systému, jeho spolehlivost, kompaktnost a použitelnost pro vybrané případy aplikace. Na základě provedené analýzy bude proveden návrh typického řešení systému, který má optimalizovanou účinnost vzhledem ke svým fyzickým rozměrům a k finanční náročnosti.

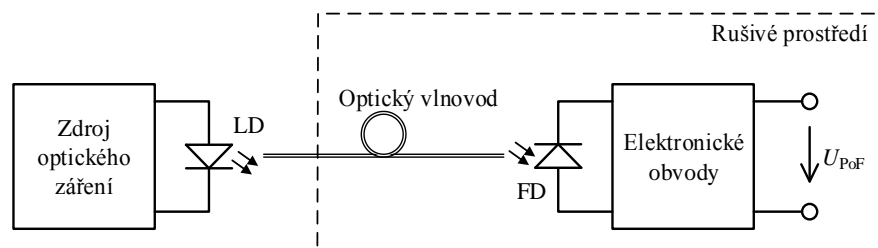
V praktické části práce bude proveden návrh experimentálního systému, který bude využívat dostupné komponenty. Bude proveden rozbor návrhu s cílem zjistit jeho očekávanou účinnost. Navržený systém bude realizován. Na základě výsledků experimentálního měření parametrů systému bude stanoven jeho výkon a účinnost. Ty budou porovnány s očekávanými parametry. Rozdíly v předpokládaných a dosažených parametrech budou diskutovány a budou navrženy možné úpravy systému. Bude také diskutována možnost použití systému pro napájení elektronických obvodů ve funkci vzdálených senzorů.

V anglicky psané literatuře se systémy pro přenos energie optickým vláknem pro účely napájení elektronických zařízení označují spojením "Power-Over-Fiber" (PoF). Z důvodu této zavedené terminologie bude proto tohoto výrazu rovněž používáno.

Tento dokument je rozdělen na šest částí. V první kapitole je popsán princip zdroje PoF. Druhá kapitola pojednává o teoretických vlastnostech jednotlivých částí zdroje PoF. Jsou zde uvedeny různé technologie provedení a diskutována jejich vhodnost pro efektivní využití v systému PoF. Ve třetí kapitole je uvedeno několik komerčních zařízení PoF. Čtvrtá kapitola se věnuje popisu možného návrhu optické části systému PoF. Samotný návrh experimentálních systémů napájecího zdroje PoF je uveden v páté kapitole. Poslední kapitola obsahuje popis realizace a měření. Změřené hodnoty jsou porovnány s teoretickými hodnotami zjištěnými při návrhu.

1 PRINCIP ZDROJE POWER-OVER-FIBER

Zjednodušené blokové schéma znázorňující princip zdroje Power-Over-Fiber (PoF) je uvedeno na obr. 1. První blok představuje zdroj optického záření. Optického záření je používáno z důvodu možnosti jeho přenosu dielektrickými vlnovody, jako jsou optická vlákna. Hlavní součástí zdroje optického záření je typicky laser, například laserová dioda (LD) nebo jiný pevnolátkový laser. Tento blok také obsahuje obvody pro nastavení pracovního bodu laseru. Přenosové médium světelné energie je optický vlnovod. Fotodetektor v podobě například fotodiody (FD), pracující ve fotovoltaickém režimu, mění světelnou energii z optického vlákna na elektrickou energii, která je zpracována dalšími elektronickými obvody (např. nábojové pumpy, DC/DC konvertory).

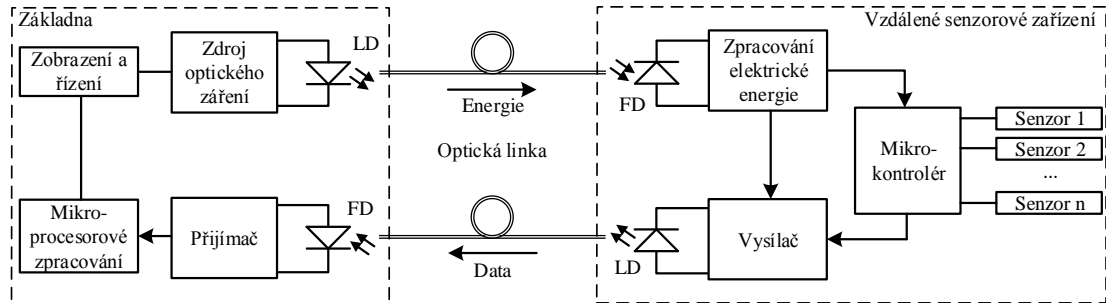


Obr. 1: Blokové schéma PoF.

Jako zdroj záření je nejvýhodnější použít laser, který dosahuje vysoké intenzity záření, a tedy i výkonu, soustředěných do oblasti přenosového prostředí s velmi malým průřezem optického svazku. Laser proto bude dále uvažován jako zdroj záření v systému PoF. Jako přenosové médium je výhodné použít vhodný typ optických vláken, které dosahují velmi nízkých útlumů přenášených výkonů. Případně je možno použít svazku optických vláken pro zvýšení možného přenášeného výkonu. Pro další popis systému bude proto uvažováno použití optického vlákna. Pro převod optického záření na elektrickou energii se jeví nejvhodnější možností fotovoltaické články, např. v podobě polovodičových fotodiód, které mají kompaktní rozměry a mohou dosáhnout značné účinnosti. Pro další popis bude tedy dále uvažováno použití polovodičové fotodiody.

Elektrickou energií s výstupním napětím U_{PoF} je možno napájet elektronická zařízení. Zařízení mohou být umístěné v rušivém prostředí (například v okolí vysokonapěťového transformátoru), kde při napájení měděnými vodiči hrozí na těchto vodičích vznik indukovaného napětí, které by mohlo způsobit poruchy činnosti citlivých integrovaných obvodů uvnitř napájeného zařízení. Zdrojem PoF lze napájet například nízkopříkonové senzory nebo mikrokontroléry (sloužící například k ukládání údajů do paměti) mající spotřebu řádově v jednotkách, desítkách nebo maximálně stovkách mW. Systémem PoF lze také napájet celé sensorové zařízení, které posílá změřená data zpět po datové optické lince (viz literatura [1] a [2]). Ukázka blokového schématu tohoto systému je uvedena na obr. 2. Změřené údaje pomocí senzorů mohou být na straně základny bezprostředně zpracovávány a zobrazovány. Také je možné po jednom optickém vlákne přivádět změřená data i napájecí energii zároveň. Například dle [3] použitím vlnového multiplexu (wavelength-division multiplexing – WDM), kterým je zavedena napájecí optická energie na jedné vlnové délce záření a přiváděná data na jiné

vlnové délce do jednoho optického vlákna. Použité WDM zařízení musí podporovat vysoké optické výkony. Nebo použitím vláken s dvojitým pláštěm tzv. Double-Clad Fiber (DCF) dle [4], kde v jádře vlákna jsou převáděna data a ve vnitřním plášti DCF je převáděna napájecí energie.



Obr. 2: Blokové schéma opticky napájeného senzorového systému. [1]

Největší výzvou pro obecný systém PoF je přenést do zátěže co největší výkon na velkou vzdálenost s dostatečnou stabilitou, účinností a spolehlivostí. Velikost přeneseného výkonu P_{FD} je závislá hlavně na použitém laseru, optickém vlákne a fotodiodě. Množství tohoto výkonu se dá spočítat dle následujících rovnic: [3]

$$P_{FD} = P_{In} \cdot \eta_{FD}, [W] \quad (1)$$

$$P_{In} = P_{Fiber} \cdot \alpha_{Fiber} \cdot \alpha_{Conn}, [W] \quad (2)$$

kde P_{In} je optický výkon na vstupu fotodiody, η_{FD} je účinnost fotodiody, P_{Fiber} je optický výkon navázaný z laserové diody do vlákna, α_{Fiber} je útlum optického vlákna a v α_{Conn} jsou zahrnuty útlumy vzniklé odrazem záření na optických konektorech. Tyto ztráty je nutné převést z logaritmické míry: [3]

$$\alpha_{Fiber} = 10^{\left(-\frac{L \cdot \alpha_{FiberdB}}{10}\right)}, [-] \quad (3)$$

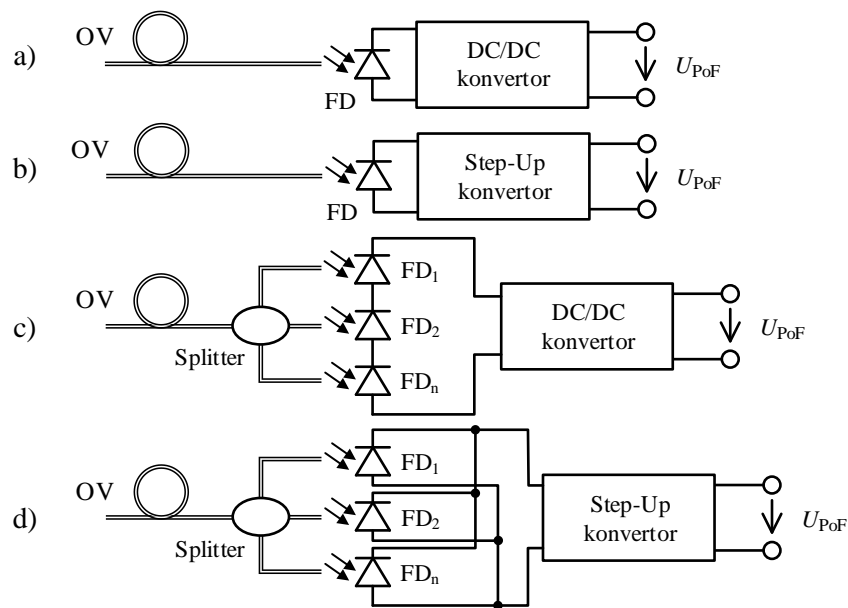
$$\alpha_{Conn} = 10^{\left(-\frac{\alpha_{ConndB}}{10}\right)}, [-] \quad (4)$$

kde $\alpha_{FiberdB}$ je útlum vlákna v jednotkách dB/km, L je délka použitého vlákna v kilometrech a α_{ConndB} je útlum všech použitých konektorů v decibelech. Velikost útlumu běžného optického vlákna bývá maximálně v jednotkách dB/km. Předpokládaná délka vlákna pro prototyp je pouze 1 m, takže vliv útlumu vlákna na celkovou účinnost PoF systému nebude velký. Velikost útlumu konektoru závisí na jeho typu. Běžné konektory však nemají útlum větší než 0,5 dB. Vyzářovaný optický výkon P_{LD} nesmí dle nerovnice: [3]

$$P_{LD} \leq P_{MaxFiber} [W] \quad (5)$$

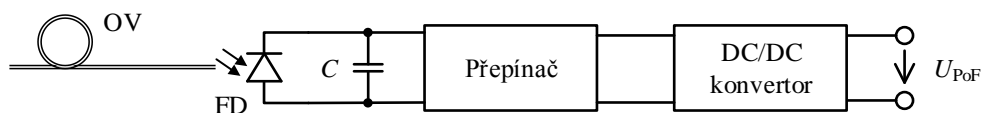
překročit maximální možný optický výkon $P_{MaxFiber}$, který může být vyzářen do vlákna bez jeho poškození.

Elektronická zařízení připojená na zdroj PoF nevyžadují k provozu jen energii dodávanou s minimálním výkonem. Ke své funkčnosti potřebují také specifické napájecí napětí U_{PoF} , jehož hodnota se pro každý obvod liší. Aby bylo možné takovouto hodnotu napětí U_{PoF} poskytnout, je nutné do systému PoF za fotodiodu přiřadit měnič stejnosměrného napětí (DC/DC konvertor viz obr. 3 a)), který převede hodnotu napětí fotodiody na požadovanou hodnotu napětí U_{PoF} a zároveň ji stabilizuje. Jelikož u většiny fotodiód je výstupní napětí ve fotovoltaickém režimu menší než 2 V a současně většina vyráběných DC/DC měničů neumí s takto nízkým napětím pracovat, je nutné použít zvyšující měnič napětí, takzvaný step-up konvertor (viz obr. 3 b)). step-up konvertor zvýší napětí na požadovanou velikost. Zajímavou možností, jak se vyhnout použití step-sp konvertoru, je použití děliče optického výkonu, takzvaného optického splitteru (viz obr. 3 c)). Optický splitter má obvykle n výstupů a každý z nich je propojen s n fotodiódami, které jsou zapojeny v sérii. Výsledné napětí vstupující do DC/DC konvertoru je tak součtem všech napětí na fotodiódách FD_1 až FD_n . Pokud je požadován vyšší proud do zátěže, lze na úkor úbytku napětí přepojit fotodiody ze sériové do paralelní kombinace (viz obr. 3 d)). Také se nabízí možnost použití sério-paralelní kombinace zapojení FD.



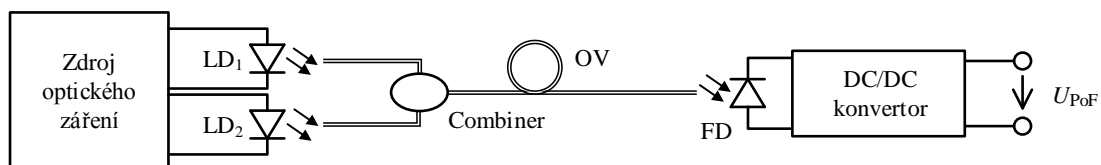
Obr. 3: Způsoby zapojení přijímače PoF, a) s DC/DC konvertorem, b) se step-up konvertorem, c) se sériovými FD a DC/DC konvertorem, d) s paralelními FD a step-up konvertorem. [3]

Další způsob zapojení přijímače je uveden na obr. 4. Jedná se o zapojení výhodné pro delší optické trasy nebo trasy s malým přenášeným výkonem, kde světelný výkon vyzářený z optického vlákna je příliš malý na vytvoření stálého elektrického výkonu. Princip spočívá v nabíjení kondenzátoru C na maximální svorkové napětí FD, poté přepínač na okamžik toto napětí vpustí do DC/DC konvertoru, který jej stabilizuje. Tento děj se opakuje s určitou periodou. Jak z principu funkčnosti vyplývá, je toto zapojení vhodné pouze pro obvody, které nevyžadují stálé připojení napájecího napětí. Připojený obvod je tedy s každou periodou napájen pouze na krátkou dobu (např. teploměr na dobu, která mu stačí k změření a odeslání hodnoty teploty). [3]



Obr. 4: Přijímač zdroje PoF s nabíjecím kondenzátorem. [3]

Pro zvýšení spolehlivosti systému PoF lze dle [5] pomocí takzvaného výkonového combineru sloučit výkony ze dvou laserových diod a tím zamezit výpadku napájeného zařízení při poruše jedné z LD (viz obr. 5). Výkonovým combinerem je také možné přivést do vlákna výkon ze dvou LD a tím razantně zvýšit převáděný optický výkon.



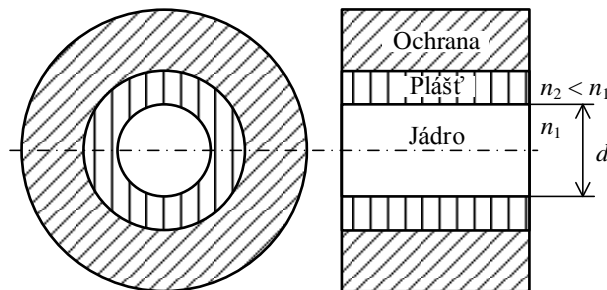
Obr. 5: Zapojení vysílače PoF se dvěma LD. [5]

2 HLAVNÍ ČÁSTI ZDROJE POF

V této kapitole budou podrobně rozebrány jednotlivé části celého konceptu napájecího zdroje PoF. Budou zde uvedeny různé technologie provedení a diskutována jejich vhodnost pro efektivní využití v systému PoF. Také zde bude probrána problematika navázání optického výkonu do vlákna a optovláknové konektory.

2.1 Optický vlnovod

Optický vlnovod je klíčovou součástí systému PoF a jeho úkolem je převádět optický výkon z optického zdroje do optického přijímače. Optický vlnovod může být různého provedení. Nejvýhodnější provedení se jeví v podobě optického vlákna, protože optické vlákno má dobrou kompaktnost, nízkou cenu, nízký útlum a vyhovující výkonové zatížení. Optické vlákno je nominálně dielektrický válcový vlnovod, který ohraničuje a vede světelné vlny podél své osy. [6] Až na některé speciální typy mají optická vlákna strukturu dle obr. 6. Na obrázku je zobrazen vlevo příčný a vpravo podélný průřez vlákna. Optické vlákno se tedy skládá z jádra s indexem lomu n_1 a průměrem d , pláště s indexem lomu n_2 a ochrany. Index lomu jádra je mírně vyšší než index lomu pláště. Jádro a plášť je ve většině případů vyráběno z křemenného skla (SiO_2) nebo z plastu. Typický průměr jádra značený písmenem d bývá uváděn v jednotkách až desítkách μm . Ochrana vlákna ve většině případů nebývá jen jednovrstvá, ale je složená z více vrstev pro lepší ochranu proti mechanickému poškození a přírodním vlivům.



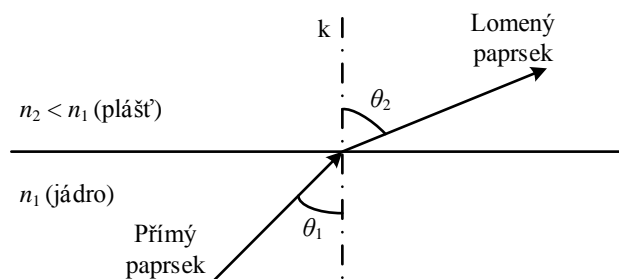
Obr. 6: Příčný a podélný průřez optického vlákna. [6]

Princip šíření záření ve vlákne může být popsán pomocí vlnové teorie. Jednodušší a často dostačující je popis pomocí paprskové geometrické teorie, která bude dále používána. Světlo se může šířit vláknem díky jevu zvanému totální odraz světelného paprsku na rozhraní mezi jádrem a pláštěm vlákna. Tento jev vychází ze Snellova zákona, který popisuje lom světla na rozhraní dvou různých optických prostředí a je definován rovnicí: [6]

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2. \quad (6)$$

Kde úhly a indexy lomu jsou definovány na obr. 7. Mohou nastat dva případy lomu světla. K lomu paprsku ke kolmici dojde tehdy, kdy paprsek světla prochází z prostředí opticky

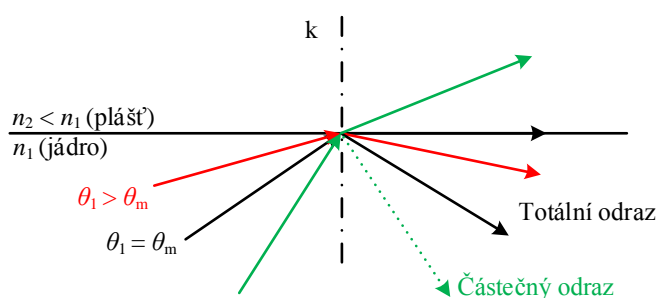
řidšího do opticky hustšího. Naopak k lomu paprsku od kolmice dochází při průchodu světla z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí. Opticky hustší prostředí je charakteristické větším indexem lomu n , než má prostředí opticky řidší.



Obr. 7: Lom paprsku od kolmice. [6]

K totálnímu odrazu může dojít jen při průchodu světla z prostředí opticky hustšího do opticky řidšího. Nastává tehdy, kdy je úhel dopadu paprsku θ_1 dostatečně velký, aby úhel lomu dosáhl nejvyšší možné hodnoty $\theta_2 = 90^\circ$ (viz obr. 8). Při větším úhlu dopadu θ_1 k lomu světla nedochází a světlo se od rozhraní pouze odráží. Hraniční úhel dopadu se nazývá úhel mezní a lze vypočítat z rovnice: [7]

$$\theta_m = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right). [^\circ] \quad (7)$$



Obr. 8: Totální odraz. [7]

Index lomu světla n je v optice důležitou látkovou konstantou. Je definován jako: [6]

$$n = \frac{c}{v}, [-] \quad (8)$$

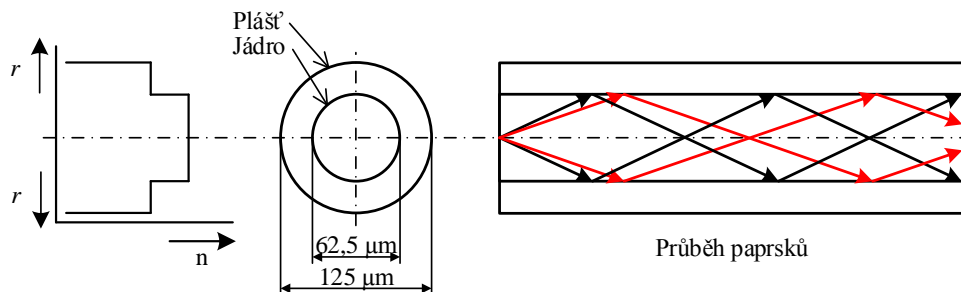
kde $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s je rychlost světla ve vakuu a v je rychlost světla v daném látkovém prostředí. Index lomu čistého skla mění se s vlnovou délkou nabývá hodnot od 1,453 na 850 nm do 1,445 na 1550 nm vlnové délky. Přidáním příměsí jako je germanium nebo bor k čistému sklu při výrobě vlákna, lze mírně zvyšovat index lomu jádra a tím vytvořit podmínky pro zmiňovaný totální odraz. Typický rozdíl mezi indexem lomu jádra a pláště je od 0,2 do 3 procent. [6]

Základní rozdělení optických vláken podle počtu vedených vidů je na jednovidová (SMF) a mnohovidová (MMF). Dále jsou roztržena podle konstrukce jádra na vlákna se

skokovou změnou indexu lomu (SI) a gradientní vlákna (GI). Nejčastěji používanými druhy optických vláken jsou:

2.1.1 Mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu

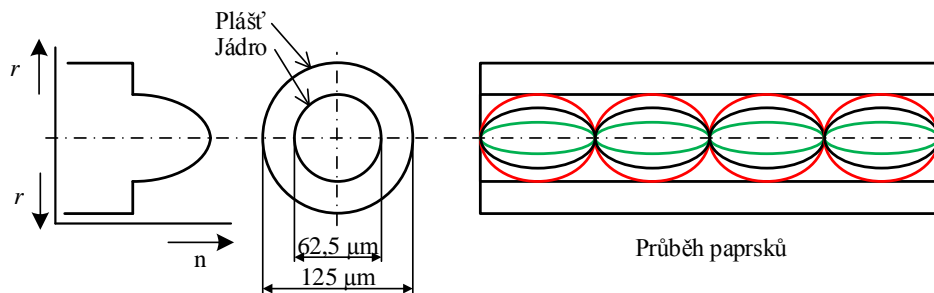
Konstrukce MMF SI (Multi Mode Fiber Step-index) je vyobrazena na obr. 9. Na obrázku jsou také znázorněny směry průběhu paprsků vláknem, pro které platí již popsaný totální odraz na rozhraní jádra a pláště vlákna. Jádro tohoto typu vlákna má typicky průměr 50 μm nebo 62,5 μm a průměr pláště 125 μm . Existují však vlákna s větším průměrem jádra. Zpravidla se jedná o vlákna s plastovými jádry nebo skleněnými jádry obalenými plastovým povlakem. Tyto vlákna jsou lacinější, mají větší numerickou aperturu, která bude popsána dále. Zato ale mají větší ztráty, menší teplotní odolnost a rychleji stárnou. Numerická apertura obecně u MMF je vzhledem k velikosti jádra vyšší než u ostatních typů vláken. Hodnota apertury se pohybuje v rozmezí 0,2 až 0,6. [8]



Obr. 9: Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu. [8]

2.1.2 Mnohovidová gradientní vlákna

Mnohovidová vlákna s gradientním průběhem indexu (Multi Mode Fiber Gradient-Index – MMF GI) lomu mají jiný princip šíření paprsků v optickém vlákně (viz obr. 10). Z průběhu indexu lomu MMF GI je vidět, že ve středu jádra je index lomu nejvyšší a směrem k plášti postupně klesá. Díky této konstrukci se světlo šířící se vláknem ohýbá. Rozměry jádra tohoto typu vlákna bývají 50 nebo 62,5 μm a numerická apertura kolem hodnoty 0,24. Vlákno je používáno na vlnových délkách 580 a 1300 nm. [8] Výroba tohoto typu vlákna je složitější, což se podepisuje i na jeho ceně. Tento typ vlákna nemá pro přenos energie žádné podstatné výhody, a tak stačí použít MMF SI.

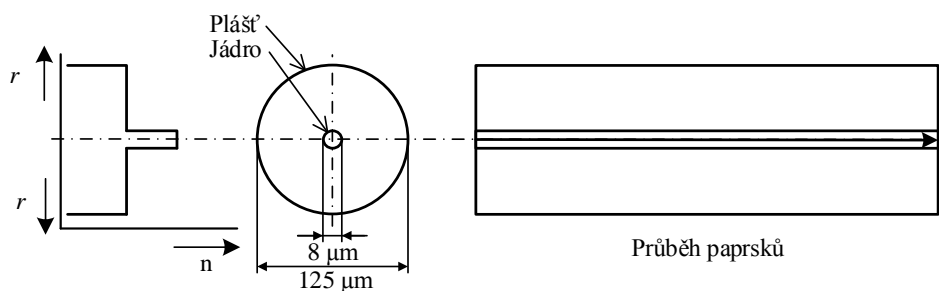


Obr. 10: Mnohovidové gradientní vlákno. [8]

2.1.3 Jednovidová vlákna

Jednovidová vlákna (Single Mode Fiber – SMF), jak je patrné ze struktury na obr. 11, mají malé rozměry jádra v rozmezí 5 až 10 μm . V jádře SMF existují podmínky pro efektivní nízkoztrátové šíření pouze jednoho základního vidu. U těchto vláken je obtížné efektivně navázat optický výkon do jádra, nejen kvůli jeho malým rozměrům, ale také kvůli velmi malé numerické apertuře, pohybující se v rozmezí 0,08 – 0,15. [8]

Vzhledem k obtížnosti navázání světelného výkonu do malého jádra vlákna, se tento typ vlákna zdá být nevýhodný pro využití v napájecím zdroji PoF. Výhodu však nachází při napájení zařízení umístěných ve velké vzdálenosti od optického vysílače, a to díky výrazně menšímu útlumu vlákna v dB/km na vyšších pracovních vlnových délkách (viz kapitola 2.1.5).



Obr. 11: Jednovidové vlákno. [8]

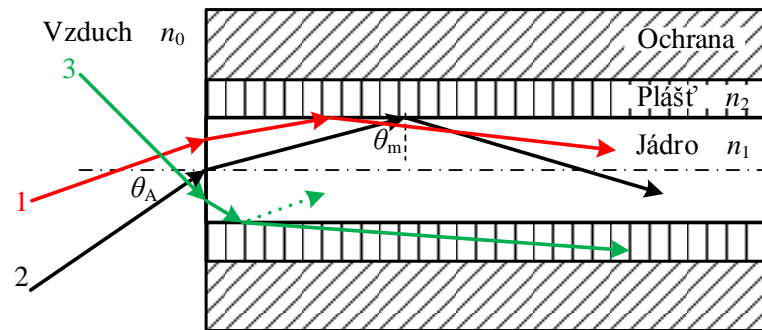
Důležitými parametry optického vlákna, které ovlivňují přenášený výkon zdroje PoF jsou:

- Numerická apertura (NA)
- Útlum ($\alpha_{\text{Fiber dB}}$)
- Obsah iontů OH^-
- Parametr MFD u jednovidových optických vláken
- Maximální optický výkon, co může proudit vláknem bez jeho zničení (P_{MaxFiber})
- Pracovní vlnová délka (λ)
- Průměr jádra (d)

2.1.4 Numerická apertura

Numerická apertura definuje největší úhel θ_A (takzvaný akceptační úhel), pod kterým je navázán světelný paprsek do optického vlákna, aniž by došlo k jeho ztrátě v plášti. Na obr. 12 je uveden příklad navázání tří paprsků do vlákna se skokovou změnou indexu lomu. Všechny paprsky se při vstupu do vlákna na rozhraní vzduch – jádro lomí směrem ke kolmici, protože prochází z prostředí opticky řidšího do hustšího. Paprsek č. 1 vstoupí do vlákna pod úhlem menším než θ_A , lomí se a dopadá na rozhraní jádro – plášť pod dostatečně velkým úhlem, aby došlo k totálnímu odrazu. Paprsek se tak šíří vláknem s minimálním útlumem. Paprsek č. 2 je hraniční, dopadající pod úhlem θ_A , aby došlo k totálnímu odrazu na rozhraní jádro – plášť pod úhlem θ_m . Naopak paprsek č. 3 vstupuje do vlákna pod větším úhlem než θ_A , lomený dopadá na rozhraní jádro – plášť pod menším

úhlem než θ_m , není tedy splněna podmínka pro totální odraz a paprsek č. 3 postupně zaniká v plášti.



Obr. 12: Navázání paprsku do optického vlákna. [7]

Definice numerické apertury u vlákna se skokovou změnou indexu lomu je: [6]

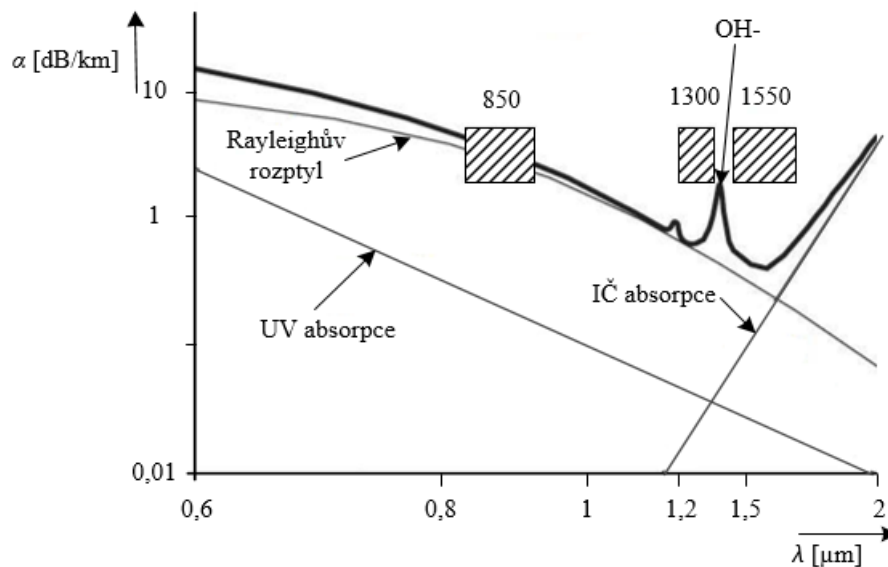
$$NA = n_0 \cdot \sin \theta_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad [-] \quad (9)$$

Kde podle obr. 10 je n_0 index lomu prostředí mimo vlákna (v tomto případě vzduchu), úhel θ_A je maximální úhel navázání paprsku do vlákna a n_1, n_2 jsou indexy lomu jádra a pláště vlákna. U gradientních vláken je výpočet numerické apertury jiný.

Numerická apertura je z hlediska přenášeného výkonu PoF velmi důležitá, jelikož charakterizuje schopnost vlákna navázat optický výkon ze světelného zdroje do jádra vlákna. Čím je numerická apertura vyšší, tím je účinnost navázání optického výkonu ze zdroje vyšší a tím menší jsou i požadavky na směrovost vyzářovací charakteristiky světelného zdroje. S numerickou aperturou také souvisí průměr jádra optických vláken, čím je průměr vyšší, tím je hodnota NA vyšší.

2.1.5 Útlum

Útlum optického vlákna je měřítkem ztrát optické energie ve vlákně a se zvětšující délkou vlákna stoupá. Útlum optického vlákna má značku α_{FiberdB} a je zpravidla udáván v jednotkách dB/km. Ze závislosti útlumu na pracovní vlnové délce skleněného optického vlákna (viz obr. 13) je patrné, že pro přenos optické energie s minimálním útlumem, je vhodné okolí tří vlnových délek (tzv. pracovní okna). První okno na vlnové délce okolo 850 nm není příliš výhodné z hlediska velikosti útlumu, ale součástky pracující na této vlnové délce jsou levnější a pro práci s mnohovidovými vlákny dostačují. Druhé a třetí okno na vlnových délkách okolo 1300 a 1550 nm je využíváno pro jednovidové šíření světla vlákem. Jelikož útlumy ve druhém a třetím okně jsou menší než 0,5 dB/km, je výhodnější tyto vlnové délky použít pro přenos energie na velké vzdálenosti.



Obr. 13: Útlum skleněného optického vlákna. [7]

Velikost útlumu je vždy vztažena k pracovní vlnové délce λ vlákna. Celkový útlum optického vlákna je dán součtem jednotlivých složek: [8]

$$\alpha_{\text{FiberdB}} = \alpha_A + \alpha_R + \alpha_N + \alpha_{MO} + \alpha_O, \text{ [dB/km]} \quad (10)$$

kde jednotlivé složky jsou:

- α_A útlum absorpcí
- α_R Rayleighův rozptyl
- α_N rozptyl na makroskopických neregularitách
- α_{MO} rozptyl na mikroohybech
- α_O rozptyl na makroohybech a jiných deformacích

Útlum absorpcí je závislý na vlnové délce optického záření a rozděluje se na vlastní a nevlastní absorpci v materiálu jádra. Vlastní absorpce se projevuje pohlcením části přenášeného optického záření vlastními molekulami materiálu, z kterého je jádro vyrobeno. Zatímco u nevlastní absorpce dochází k pohlcení části optického záření v molekulách nečistot. Nečistoty se do vlákna mohou dostat již při výrobě vlákna nebo při špatně provedené vnější ochraně vlákna. U kvalitnějších vláken musí být koncentrace iontů železa, mědi a chromu menší než 10^{-9} a u vody menší než 10^{-7} . [7]

Ztráty Rayleighovým rozptylem jsou způsobeny kolizí mezi procházejícím zářením a molekulami hmoty jádra optického vlákna. Paprsky se částečně lomí a odráží do všech směrů. Takto částečně rozptýlené optické záření může proniknout do pláště vlákna a tam zaniknout.

Ztráty na makroskopických neregularitách jsou způsobeny především vzduchovými bublinkami, trhlinkami v materiálu a nepřesnostmi ve tvaru jádra a pláště vlákna. Všechny tyto nedostatky lze výrazně omezit vhodnou technologií výroby vlákna.

Mikroohyby jsou malé odchylky od přesné roviny přechodů jádro-plášť a plášť-ochrana vlákna, které mohou vzniknout při výrobě vlákna nebo deformacích vlákna

působením okolního prostředí. Světelné paprsky dopadající na tyto odchylky mohou unikat mimo jádro optického vlákna.

Makroohyby jsou způsobeny nesprávnou instalací vlákna. Jedná se ohyb vlákna pod poloměrem ohybu menším, než dovoluje hodnota z katalogu výrobce. Ohnutím vlákna dochází ke změně úhlů dopadu přenášených paprsků na rozhraní jádro-plášť. Některé paprsky tak nesplní podmínku totálního odrazu a lomí se do pláště vlákna, kde zanikají. Velikost útlumu na ohybu vlákna závisí na velikosti poloměru ohybu. Při vyšších přenášených optických výkonech se tyto ohyby zahřívají a mohou se i roztavit. Zahřáté místo vlákna může být degradováno, což má za následek ztrátu životnosti a stálé zvýšení útlumu vlákna. Všeobecně platí, že čím je průměr vlákna vyšší, tím větší je minimální poloměr ohybu. Plastová vlákna jsou vůči ohybu odolnější. Útlum způsobený makroohyby je velmi podstatný, pokud nejsou dodržena pravidla pro správnou instalaci vlákna, může dojít k úplné ztrátě výkonu.

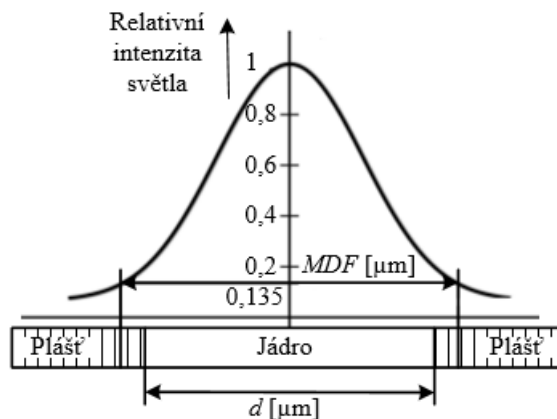
Ztráty α_A , α_R , α_N a α_{MO} v optickém vlákne nejsou příliš velký problém pro zdroj PoF, který má optické vlákno dlouhé desítky metrů. V této aplikaci se ztráty více projeví při použití delšího vlákna než 1 km.

2.1.6 Obsah iontů OH^-

V průběhu výrobního procesu vlákna zůstává ve vlákne zbytková vlhkost ve formě iontů OH^- . Tato vlhkost velmi ovlivňuje útlum vlákna na vlnových délkách okolo 1390 nm. V předchozí charakteristice (viz obr. 11) je na této vlnové délce vidět „špička“, která je způsobena právě OH^- absorpcí. Optická vlákna jsou vyráběna s vysokým obsahem iontů OH^- (high OH^-) nebo s nízkým obsahem iontů OH^- (low OH^-). [8]

2.1.7 Parametr MDF (Mode Field Diameter)

Parametr MDF (Mode Field Diameter) uvádějí výrobci místo průměru jádra jednovidových vláken, protože u těchto vláken se optické záření šíří nejen v jádře, ale částečně i v plášti. Na obr. 14 je znázorněna definice parametru MDF. Jedná se o šířku, ve které intenzita záření v jednovidovém vlákne je větší nebo rovna 13,5 % z maximální intenzity záření. Parametr MDF je závislý na pracovní vlnové délce vlákna. Čím je vlnová délka vyšší, tím je vyšší parametr MDF. [8]



Obr. 14: Definice MDF. [8]

Asi největším problémem s přenášením vysokých výkonů pomocí optického vlákna je výskyt tzv. „fiber-fuse“ efektu v optickém vlákně. Tento jev byl poprvé objeven v roce 1987 na standardním SMF vlákně, při buzení vlákna optickou energií 5 MW/cm^2 na vlnové délce 1064 nm . [3] Efekt vzniká v místě vlákna s největší teplotou, vlákno se v tomto místě doslova rozsvítí a světlo se pohybuje směrem od optického zdroje rychlostí okolo 1 m/s . Při vzniku tohoto jevu je vlákno natrvalo zničeno.

Výrobci vláken udávají, že odhadovaná bezpečná velikost plošné hustoty výkonu vyzářeného do křemíkového vlákna (tedy vázání výkonu ze vzduchu do skleněného jádra) je 250 kW/cm^2 . Dále také udávají teoretickou maximální plošnou hustotu výkonu, která může být chvilkově přivedena na čelní hranu křemíkového vlákna bez rizika jeho poškození. Velikost je odhadnuta na 1 MW/cm^2 , avšak velmi závisí na systému, způsobu navázání paprsků, čistotě čela vlákna a rovnosti řezu. [9]

Aby mohl napájecí zdroj PoF přenášet vysoké výkony, potřebuje robustní a tepelně odolná optická vlákna nebo na delší vzdálenosti SMF vlákna s malým útlumem. Jsou k dispozici mnohovydová vlákna s velkými průměry jader, nejlépe větších než $62,5 \text{ }\mu\text{m}$, která jsou nezbytná k přenosu vysokých optických výkonů. Například v literatuře [3] je uvedeno, že prahový výkon vedený MMF SI o průměru jádra $62,5 \text{ }\mu\text{m}$ je 4 W na vlnové délce 1060 nm (odpovídá plošné hustotě výkonu $0,13 \text{ MW/cm}^2$). Zatímco typickým SMF vláknem (MDF = $7,8 \text{ }\mu\text{m}$) lze dle literatury [3] převést optický výkon maximálně $1,5 \text{ W}$ na vlnové délce 1467 nm (odpovídá plošné hustotě výkonu $3,14 \text{ MW/cm}^2$). U příkladu se SMF vláknem je velikost plošné hustoty výkonu ve vlákně už dosti vysoká. U MMF SI s průměrem jádra větším než $200 \text{ }\mu\text{m}$ je bezpečná velikost přenášeného výkonu mnohem vyšší. Například u MMF SI vláken s numerickou aperturou $0,39$ lze bezpečně převést výkony $0,2 \text{ kW}$ (pro průměr jádra $200 \text{ }\mu\text{m}$) až $11,3 \text{ kW}$ (pro $1500 \text{ }\mu\text{m}$). [9]

2.2 Optický zdroj

Další důležitou součástí zdroje PoF je optický zdroj, který zajišťuje konverzi elektrické energie na energii optickou. Od optického zdroje použitého v napájecím zdroji PoF se očekává:

- Co největší účinnost přeměny energie
- Co nejužší směrová charakteristika výstupního světelného záření
- Co nejméně ztrátové napojení optického záření do optického vlákna
- Vyzářování na vlnových délkách, vhodných pro nejméně ztrátový přenos energie optickým vláknem
- Dostatečný optický výkon výstupního záření
- Dobrá teplotní stálost zdroje
- Stabilní vyzářovaný optický výkon zdroje

Nejčastěji používané světelné zdroje pro vyzářování do optického vlákna jsou levné elektroluminiscenční diody (LED) a dražší výkonné laserové diody (LD) s komplexní polovodičovou strukturou.

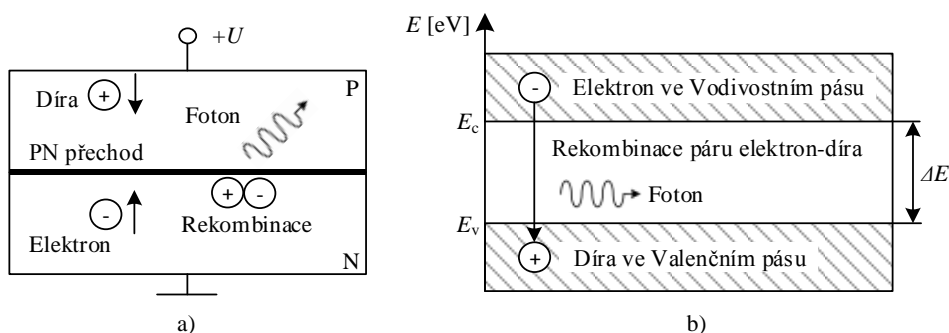
2.2.1 Elektroluminiscenční dioda

Struktura LED (viz obr. 15 a)) se skládá z P a N polovodiče. Hranice mezi polovodiči se

nazývá PN přechod. Pokud je takovýto polovodič napájen, dochází k rekombinaci páru elektron-díra, při které je emitováno nekoherentní záření ve formě fotonů. Na obr. 15 b) je vyobrazen energetický model PN přechodu. Díry se nachází ve valenčním pásu a elektrony v pásu vodivostním. Velikost emitované energie ΔE ve formě fotonů je rovna rozdílu energetických hladin $E_c - E_v$. Vztah mezi emitovanou energií ΔE a vlnovou délkou λ je: [6]

$$\Delta E = \frac{1,24}{\lambda} = h \cdot f, [\text{eV}] \quad (11)$$

kde $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s je Planckova konstanta a f je frekvence. Velikost vlnové délky emitovaného záření je závislá na materiálu, ze kterého je dioda vyrobena, tedy na rozdílu energetických hladin daného materiálu (viz tab. 1).



Obr. 15: a) PN přechod, b) Energetický model PN přechodu. [6]

Tab. 1: Vlastnosti materiálů některých LED a LD. [6]

Materiál	λ [nm]	$\Delta E = E_c - E_v$ [eV]
GaAs	900	1,4
GaAlAs	800-900	1,4-1,55
InGaAs	1000-1300	0,95-1,24
InGaAsP	900-1700	0,73-1,35

Z hlediska navázání paprsků do optického vlákna existují dva typy provedení LED, a to čelně emitující a hranově emitující. Vyzářovací diagram LED má obvykle tvar širokého kužele, proto je lze navázat pouze na mnohovidová vlákna, která mají větší průměr jádra. Pro použití v aplikaci PoF nejsou moc zajímavé, protože jejich vyzářované optické výkony nejsou nikterak velké a je problém je efektivně navázat do vlákna.

Například čelně emitující LED má výstupní výkon okolo 15 mW při řídicím proudu 150 mA. Zjištěný výkon byl měřen v bezprostřední blízkosti od emitující diody. Napájecí napětí LED bylo okolo 2 V, z čehož vyplývá, že její účinnost se pohybovala kolem 5 %. Ve skutečnosti, kvůli její široké vyzářovací charakteristice, se do MMF vlákna dostane pouze okolo 5-10 % tohoto vyzářovaného výkonu, v závislosti na numerické apertuře vlákna. [7]

Z tohoto příkladu vyplývá, že se z této LED do MMF vyzáří pouze 0,75 až 1,5 mW,

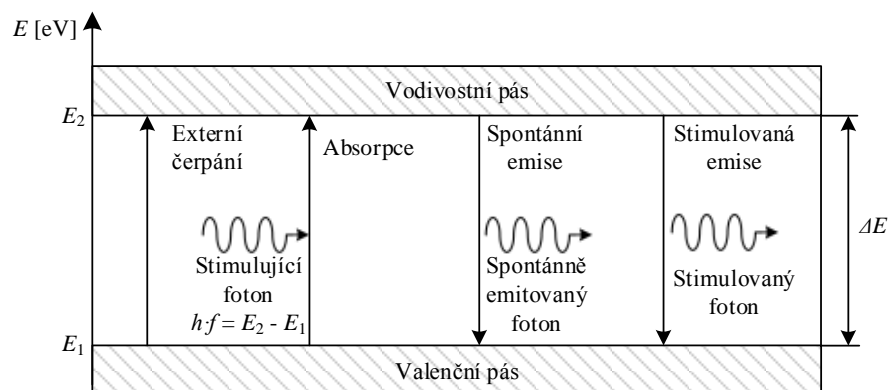
což je pro aplikaci PoF nedostatečné. Hranově emitující LED mají všeobecně menší výstupní výkon, ale mají užší vyzařovací charakteristiku než plošně vyzařující LED. [7] Takže navázání paprsků u hranově emitujících LED do vlákna je více efektivní, ale i tak pro PoF nedostačující.

2.2.2 Laserové diody

Základem funkce LD i všech laserů je proces stimulované emise. K popisu tohoto procesu slouží energetický model uvedený na obr. 16. Prvně bude popsána absorpce a spontánní emise. Při procesu absorpce je kvantovou soustavou absorbován stimulující foton. Aby došlo k absorpci, tak energie tohoto fotonu musí být rovna rozdílu energií obou uvažovaných energetických hladin E_1 a E_2 . Došlo tedy k absorpci elementárního kvanta záření určité vlnové délky, což způsobí, že elektron přeskočí z valenčního pásu do pásu vodivostního. Tento elektron se nazývá excitovaný. Za krátkou časovou dobu musí soustava přejít zpět do základního stavu. Excitovaný elektron se může vrátit do valenčního pásu buď spontánně nebo stimulovaně, a přitom vyzařuje foton.

Ke spontánní emisi dochází náhodně, tudíž fotony generované spontánní emisí mají náhodnou fázi a vlnovou délku. Excitované elektrony se vracení na různé nižší energetické úrovně E_1 vodivostního pásu, proto vyzařované světlo má široké spektrum (tedy je nekoherentní). [6]

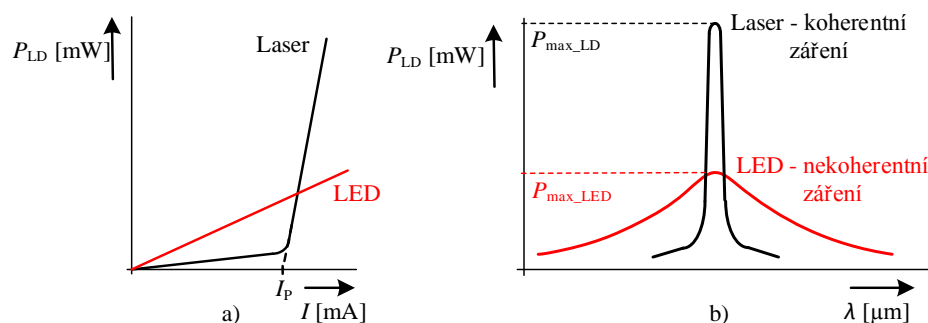
Ke stimulované emisi dochází, když nějaký stimulant (např. stimulující foton) způsobí přechod excitovaného elektronu do nižší úrovně, tedy do valenčního pásu. Emitovaný foton má stejnou energii, stejnou vlnovou délku, stejný směr šíření, stejnou fázi i polarizaci vlnění jako foton stimulující. Přičemž stimulující foton není kvantovou soustavou pohlcen, pouze prochází. Do soustavy tedy vstupuje jeden foton a jsou vyzařeny dva a dochází tak za určitých podmínek k zesilování světla. Tento typ světla je koherentní. Za normálních podmínek je počet excitovaných fotonů velmi malý, a tak ke stimulované emisi dochází málokdy. Aby mohlo dojít ke stimulované emisi častěji, musí být látka ve stavu inverzní populace nosičů náboje (elektronů). V této látce převládá počet excitovaných soustav (více elektronů ve vodivostním pásu) nad počtem kvantových soustav v základním stavu (více elektronů ve valenčním pásu). Stav inverzní populace nosičů je dosaženo dalším dodáváním elektrické energie externí energií, která čerpá elektrony do vyšší energetické hladiny. Čerpání může být elektrické nebo optické. [6]



Obr. 16: Energetický model laseru. [6]

Činnost laseru probíhá v optickém rezonátoru, tím je myšlena dutina obklopená odrazivými plochami. V této dutině musí hustota fotonů generovaných stimulovanou emisí převládat nad hustotou fotonů, které absorbuje materiál v dutině (např. v polovodičových rezonátorech ztráty v polovodičovém materiálu). Jeden z typů mechanismů laseru obsahuje zrcadla umístěná na koncích dutiny rezonátoru, z nichž jedno je částečně propustné. Většina fotonů se v dutině od těchto zrcadel odráží a putují tam a zpět přes aktivní laserové prostředí. Při cestě přes aktivní prostředí fotony stimulují další excitované elektrony, které emitují další fotony na stejné vlnové délce. Když je zisk dostatečný a překoná ztráty v dutině, dojde ke vzniku stojatého vlnění v rezonátoru na jedné vlnové délce (převládá stimulovaná emise nad spontánní emisí). Úzká oblast, ve které nastane stojaté vlnění, se nazývá práh a je definována prahovým proudem I_P laseru (viz obr. 17 a)). Před dosažením prahového budícího proudu se laser chová spíše jako LED, má malý vyzářovací výkon s velkou spektrální šířkou. Při překročení prahového proudu se zařízení začíná chovat jako laser a vyzářený výkon se začne rapidně zvyšovat s pracovním bodem. [6] Spektrální šířka vyzářeného svazku se také dramaticky zmenšuje se zvyšujícím budícím proudem (viz obr. 17 b)).

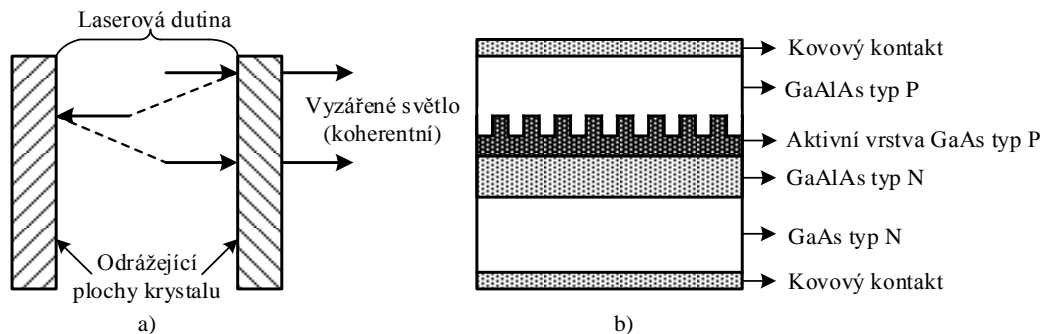
Optické záření vyzářované lasery je tedy velmi koherentní, dosahuje větších optických výkonů než u LED a má po kolimaci malou rozbíhavost svaku paprsků. Takže s použitím laserů lze lépe navázat optický výkon do optického vlákna. Nejčastěji používanými lasery k vyzářování do optického vlákna jsou polovodičové LD, protože mají adekvátní velikost a vyzářují optické záření o vhodné vlnové délce. Čtyři hlavní typy LD jsou Fabry-Perotův (FP) laser, distributed-feedback (DFB) laser, laditelné lasery s externí kavitou a vertical cavity surface-emitting lasery (VCSEL). [6]



Obr. 17: a) Vztah mezi vyzářovacím výkonem a řídicím proudem laseru a LED. [6], b) Spektrální šířka LED a laseru. [10]

Fabry-Perotův laser má laserovou dutinu tvořenou dvěma vhodně vybroušenými plochami krystalu, které jsou vzájemně perfektně rovnoběžné. Tyto plochy jsou vybroušené tak, aby měly co největší odrazivost. Jedna z ploch je částečně propustná, aby mohlo světlo vycházet ven z laseru. Od rozměrů dutiny rezonátoru se odvíjí velikost frekvence, na které rezonátor osciluje (tedy vlnová délka výstupního záření). Světlo vyzářené z laseru je vždy ve fázi. [6] Laserová dutina FP laseru je uvedena na obr. 18 a). Jeden FP laser vyzáří optický výkon od jednotek do stovek mW. Laserové pole FP rezonátorů by však dokázalo vyzářit větší výkony. Prahový proud I_P těchto laserů se pohybuje okolo 15 mA. [7] Výkon těchto laserů je silně závislý na teplotě rezonátoru. Čím menší je proud I_P laseru, tím jsou potřeba méně výkonné zdroje a teplota rezonátoru bude také méně stoupat.

Distributed-feedback (lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou) lasery nemají rezonátor tvořený zrcadly, ale obsahují prostorové periodické struktury (difrakční mřížky). Funkce DFB laseru je založena na periodické změně indexu lomu ve směru šíření. Zpětná vazba vzniká trvalým navázáním šířící se vlny do opačného směru. Na obr. 18 b) je uvedena struktura tohoto laseru. Výhodou těchto laserů je možnost práce v jednovidovém režimu pro pásmo 1,3 až 1,55 μm . [11] Výstupní výkony tohoto laseru se pohybují od 0,5 do 120 mW, v závislosti na pracovní vlnové délce, na typu a na tom zda je nebo není použito chlazení.

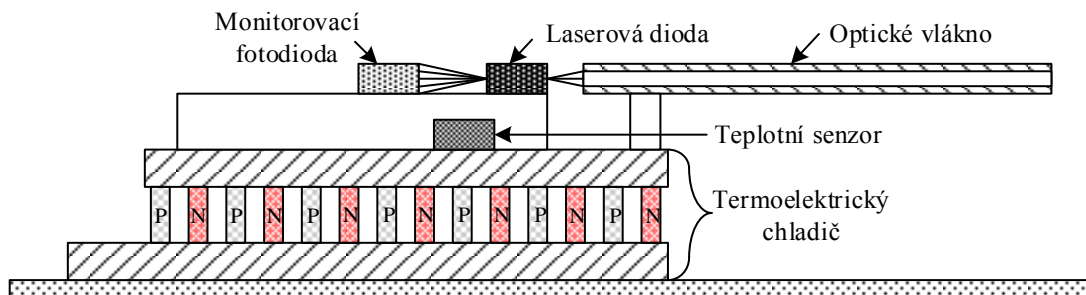


Obr. 18: a) Laserová dutina FP laseru. [6] b) Struktura DFB laseru. [11]

Laditelné lasery vznikají úpravou jednotlivých typů laserů. Ladění vlnové délky laserů však není potřebná vlastnost pro použití v aplikaci PoF. VCSEL lasery dosahují výstupních výkonů do 20 mW, [6] což je stále relativně malý výkon pro aplikaci PoF.

Výkonné LD se při vyzařování zahřívají a jejich parametry velmi jsou závislé na teplotě. Pracovní vlnová délka LD může ujíždět přibližně o 0,1 nm/°C. Se změnou teploty se také mění účinnost LD, protože se vzrůstající teplotou dochází k poklesu vyzařovacího výkonu laseru a narůstá velikost proudu I_P laseru. Zvýšená pracovní teplota laseru také značně redukuje jeho životnost, a proto je třeba lasery chladit. Standardně se k chlazení LD používá termoelektrický chladič. [6]

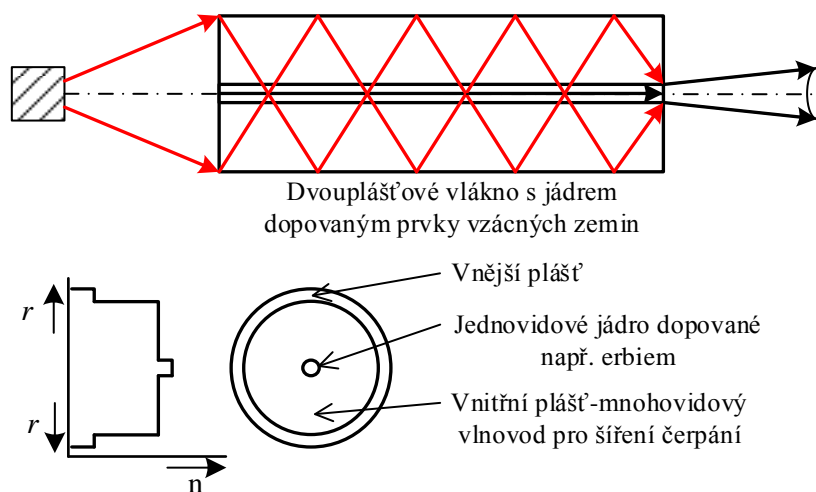
Termoelektrický chladič nakreslený na obr. 19 se skládá z pole N a P typu polovodičových materiálů, které jsou elektricky propojené v sérii a konstrukčně jsou rozloženy paralelně. Proud procházející přes takovýto chladič má schopnost odvádět přebytek tepla z jedné strany chladiče, na které je instalována LD, na druhou stranu termoelektrického chladiče. Chladič může být navržen buď k udržování konstantní teploty v okolí LD. K tomuto účelu slouží teplotní senzor umístěný na chladiči. Pokud senzor zaznamená zvýšení teploty v okolí laseru, zvýší proud procházející chladičem a přebytečné teplo je odvedeno. Nebo je navržen tak, aby bezprostředně reagoval na změny výstupního výkonu laseru, kterou monitoruje monitorovací fotodioda (viz obr. 19). Monitorovací fotodioda, která je zapojená ve zpětné vazbě s řídicími obvody chladiče, zaznamenává změny ve výstupním výkonu LD a na základě výsledků mění velikost proudu procházející termoelektrickým chladičem. Takto je udržován konstantní výstupní optický výkon LD a tím je zvýšena její životnost. [7] Udržení konstantního výstupního výkonu laseru je také velmi důležitá vlastnost u LD, které jsou použité v aplikaci PoF. Dobře chlazená LD může mít účinnost přeměny energie vyšší než 50 %. Výkonná LD se tedy jeví jako nejvýhodnější zdroj záření v experimentální aplikaci PoF.



Obr. 19: Konstrukce laserového zdroje.

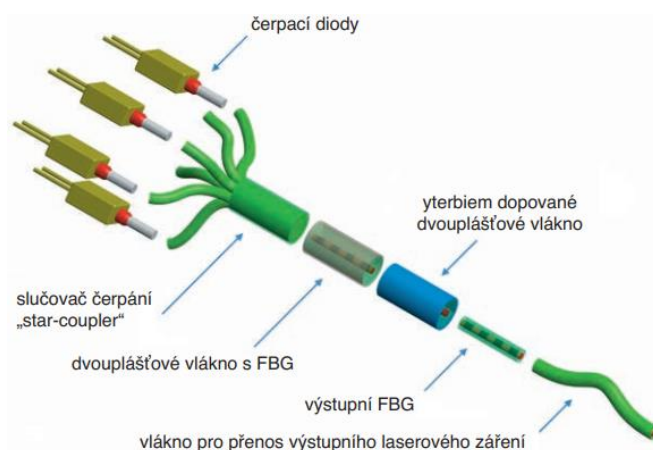
2.2.3 Vlákňové lasery

Zajímavé z hlediska výstupního výkonu by bylo použití vláknových laserů. U vláknových laserů je zesilujícím médiem optické vlákno, které má jádro dopované prvky vzácných zemin (např. erbiem, yterbiem nebo thuliem). Princip vláknového laseru s dvouplášťovým aktivním vláknem je vyobrazen na obr. 20. U těchto laserů je využita metoda čerpání aktivního prostředí přes plášť vlákna. Tímto způsobem lze navázat širší svazek z mnohavidových LD a transformovat jej do kvalitního jednovidového svazku s velkým výstupním výkonem. V jádře dvouplášťového vlákna probíhá zesílení laserového paprsku pronikajícího z vnitřního pláště. Jak je z obrázku patrné, tak jádro dopované prvky vzácných zemin má mírně vyšší index lomu než vnitřní plášť. Vnitřní plášť je též obklopen materiálem s nižším indexem lomu (např. polysiloxanovým polymerem nebo akrylátem). Jádro tedy slouží jako vlnovod pro zesílený signál a vnitřní plášť jako vlnovod pro šíření čerpání. Do širokého vnitřního pláště lze snadněji navázat záření z čerpacích LD. Toto čerpací záření, šířící se podél vlákna, křížuje oblast dopovaného jádra a v něm je absorbováno na iontech vzácných zemin. Excitované ionty pak formou stimulované emise vytváří další fotony a dochází tak k zesílení záření. Optický signál je tedy v několik metrů dlouhém dvouplášťovém vlákně zesilován díky iontům prvku vzácné zeminy. Například erbiem dopované vlákno může zesílit optický signál až 10 000x. [12]



Obr. 20: Princip čerpání aktivního vlákna přes plášť. [12]

Na obr. 21 (převzatého z literatury [12]) je vyobrazeno možné uspořádání komponent pláštěm čerpaného vláknového laseru. Jedná se o uspořádání rezonátoru Fabryho-Perotova typu, kde je rezonátor tvořen dvěma zrcadly, z nichž je jedno polopropustné. Zrcadla jsou ve většině případů realizována pomocí braggovských mřížek (FBG – Fiber Bragg Grating). Vláknem může být buzeno jedním nebo více externích LD, které nemusejí mít příliš vysoké výkony. Z principu funkčnosti vyplývá, že budící (čerpací) záření má jinou vlnovou délku než záření vystupující z vláknového laseru. [13]



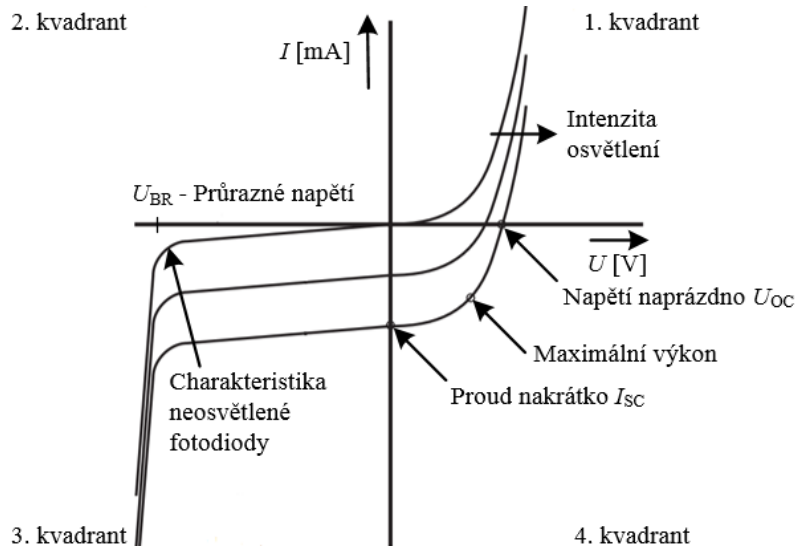
Obr. 21: Pláštěm čerpaný vláknový laser. [12]

Oproti klasickým laserům mají vláknové lasery (vzhledem k jejich délce aktivního prostředí) lepší odvod tepelných ztrát a odpadá tak nutnost použití komplikovaných chlazení. Obvykle k chlazení stačí okolní vzduch. Vláknové lasery mají lepší výkonovou stabilitu a provozní spolehlivost než jiné pevnolátkové lasery. Vláknové lasery velmi účinně konvertují výkonné záření z běžných LD s malým jasem do výkonného záření s vysokým jasem. Výhodou je, že k čerpání lze použít vysoce výkonné mnohovidové LD, které jsou levné a dostačující k zajištění vysokého výstupního výkonu vláknových laserů. Účinnost komerčních vláknových laserů dosahuje až 35 %. [12] Vláknové lasery jsou známé především díky jejich vysokým výstupním výkonům. Velikost výstupního výkonu těchto laserů se pohybuje od jednotek wattů do jednotek kilowattů. Výstupní vlnová délka vláknových laserů bývá vyšší než 1000 nm (zpravidla kolem 1550 nm). Velkou výhodou v použití tohoto typu laseru v aplikaci PoF by bylo, že půjdou snadno navázat na přenosové vlákno (např. optovláknovou konektorovou spojkou). Pro experimentální systém PoF by použití tohoto typu laseru bylo příliš komplikované a málo účinné. Navíc vláknové lasery mají až příliš vysoké výstupní optické výkony a není dostupný fotodetektor, který by byl schopný takovéto výkony zpracovat.

2.3 Převodník světla na elektrický proud

Převodník světla na elektrický proud se v napájecím zdroji PoF nachází na konci optického vlákna. Má za úkol transformovat optický výkon vyzářený z konce vlákna na elektrickou energii ve formě elektrického napětí a proudu, které lze použít k napájení elektronických obvodů. Převodník se skládá z fotodiody pracující ve fotovoltaickém režimu. Fotovoltaický režim se nachází ve 4. kvadrantu volt-ampérové charakteristiky

fotodiody (viz obr. 22). Pro lepší účinnost fotodiody je dobré nastavit pracovní bod (vhodným výběrem zátěžového odporu nebo použitím aktivního elektronického obvodu) přibližně uprostřed křivky, kde fotodioda dodává maximální elektrický výkon. V tomto místě je možné převést až 80 % dopadající optické energie. [14] Lepší volbou pro aplikaci PoF je použití fotovoltaického článku (FV), který je přímo stavěný na získávání elektrické energie ze světelného záření.



Obr. 22: Volt-ampérová charakteristika fotodiody. [14]

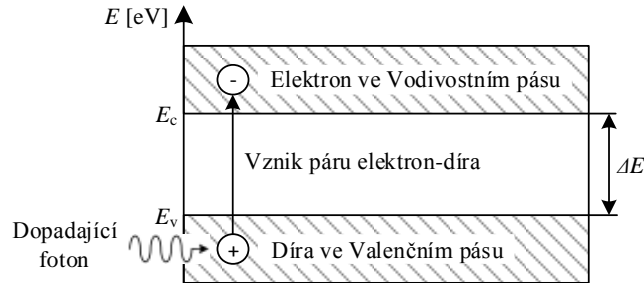
Mimo dlouhé životnosti, spolehlivosti a nízké ceny jsou hlavní požadované parametry kladené na převodník světla na elektrický proud:

- Velká účinnost přeměny energie (η_{FD} , η_{FV})
- Maximální výstupní elektrický výkon (P_{FD_max} , P_{FV_max})
- Maximální vstupní optický výkon, který nezničí fotodetektor
- Pracovní vlnová délka (λ)
- Napětí naprázdno (U_{OC})
- Proud nakrátko (I_{SC})

2.3.1 Fotodioda

Struktura polovodičové fotodiody obsahuje PN přechod a je konstruovaná tak, aby do oblasti tohoto přechodu mohlo pronikat světlo. Princip fotodiody je založen na vnitřním fotoelektrickém jevu. Na obr. 23 je znázorněn energetický model PN přechodu, na kterém je tento jev vysvětlen. V polovodičovém materiálu mohou volné elektrony a díry přebývat pouze ve dvou specifických pásích (ve valenčním a vodivostním pásu). Mezi těmito pásy se nachází zakázaný pás. Foton dopadající na PN přechod, narazí do elektronu ve valenčním pásu a předá mu svou energii. Energie dopadajícího fotonu musí být vyšší nebo rovna šířce zakázaného pásu $\Delta E = E_c - E_v$. Elektron má tedy dostatek energie, aby přeskočil z valenčního pásu do pásu vodivostního. Tento proces generuje volné elektrony a díry. Tyto volné elektrony jsou volné nosiče náboje generované dopadajícími fotony. Generované páry elektron-díra vytváří elektrické pole. Připojíme-li

na fotodiodu zátěž (např. rezistor), začne rezistorem protékat proud tvořený volnými nosiči náboje. Tento proud je známý jako fotoproud značený I_{ph} . Stále osvětlený přechod PN se tedy chová jako zdroj stejnosměrného proudu.



Obr. 23: Energetický model PN fotodiody. [6]

Jak již bylo řečeno, aby došlo ke generaci páru elektron-díra, musí dopadající foton mít energii vyšší nebo rovnou šířce zakázaného pásu. Každý polovodičový materiál má jinou šířku zakázaného pásu, a tedy na každý materiál musí dopadat fotony, mající různou energii. To znamená, že na specifický polovodičový materiál musí dopadat světlo se specifickým rozsahem vlnových délek. Velikost maximální vlnové délky světla, které obsahuje fotony s dostatečnou energií, je: [6]

$$\lambda_c = \frac{h \cdot c}{\Delta E} = \frac{1,240}{\Delta E} \cdot [\text{nm}] \quad (12)$$

Kde $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ je Planckova konstanta a c je rychlost světla ve vakuu. Protože fotony s hodně velkou energií jsou absorbovány dříve, než se dostanou k fotodetektoru, existuje také dolní hranice vlnové délky, která je schopná vytvářet fotoproud. Tudíž každý fotodetektor má daný rozsah vlnových délek, se kterými generuje proud. [6] Tabulka tab. 2 představuje přehled používaných materiálů s údaji o rozsahu pracovní vlnové délky.

Tab. 2: Vlastnosti jednotlivých polovodičových materiálů vyráběných fotodiod. [6]

Materiál	ΔE [eV]	λ_c [nm]	Rozsah λ [nm]
Křemík	1,17	1060	400-1060
Germanium	0,775	1600	600-1600
GaAs	1,424	870	650-870
InGaAs	0,73	1700	900-1700
InGaAsP	0,75-1,35	1650-920	800-1650

Jeden z důležitých parametrů fotodiod je kvantová účinnost. Kvantová účinnost je poměr počtu generovaných páru elektron-díra ku počtu dopadajících fotonů s energií $h \cdot \nu$ a je dána rovnicí: [6]

$$\eta = \frac{I_{ph}/q}{P_{In}/h \cdot \nu} \cdot 100. [\%] \quad (13)$$

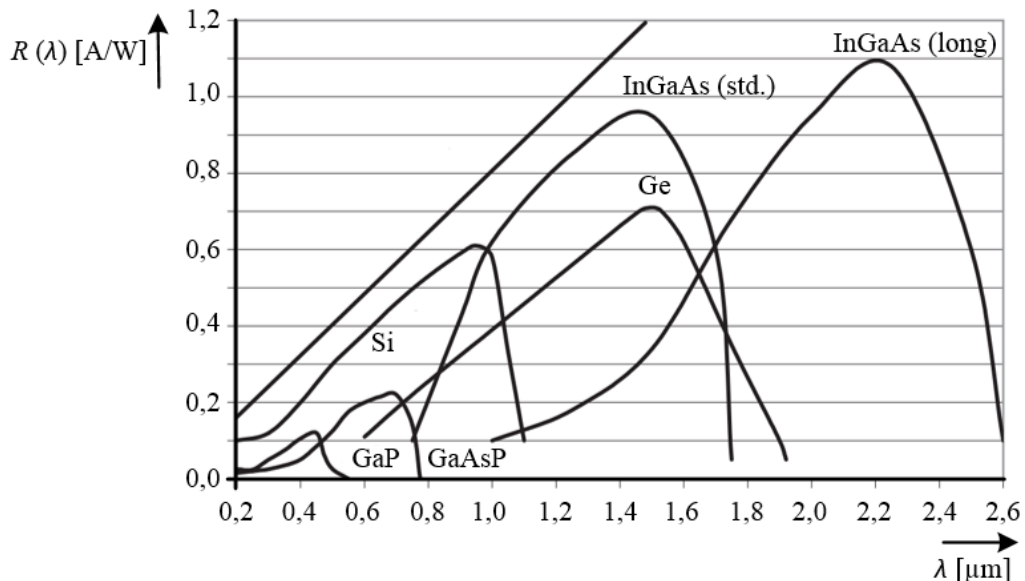
Kde $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ je náboj elektronu, I_{ph} je průměrný fotoproud generovaný stabilním proudem fotonů dopadajících na fotodiodu o průměrném dopadajícím optickém výkonu P_{In} a $\nu = c/\lambda$ je kmitočet dopadajících fotonů. V praxi 100 fotonů vytvoří 30 až 95 párů elektron-díra, což odpovídá kvantové účinnosti od 30 do 95 %. [6]

Dalším důležitým parametrem je citlivost fotodiody. Vztah mezi citlivostí a kvantovou účinností je: [6]

$$R(\lambda) = \frac{I_{\text{ph}}}{P_{\text{In}}} = \frac{\eta \cdot q}{h \cdot \nu} \cdot [\text{A/W}] \quad (14)$$

Parametr tedy určuje velikost proudu generovaného dopadajícím optickým výkonem. Charakteristiky na obr. 24 zobrazují typické hodnoty citlivosti nejpoužívanějších materiálů k výrobě fotodiód v závislosti na vlnové délce dopadajícího světla. Z charakteristik je patrné, že před maximální vlnovou délkou λ_c daného materiálu, citlivost fotodiody prudce klesá. Na charakteristice je také znázorněna hranice 100 % kvantové účinnosti. Při návrhu PoF systému je vhodné snažit se provozovat fotodiodu na vlnové délce blízké se hodnotě vlnové délky, kde má fotodioda maximální citlivost.

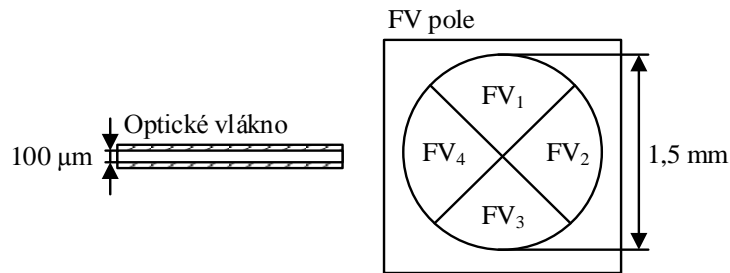
Pokud tedy známe materiál, ze kterého je fotodioda vyrobena, a známe tak i její citlivost $R(\lambda)$, je možné ze vzorce (14) vypočítat velikost proudu I_{ph} , generovaného fotodiodou. Výsledný proud produkovaný fotodiodou je však ještě zmenšený o hodnotu tzv. dark current, který mívá hodnotu řádově desítky až stovky pA. V aplikaci PoF je však tato hodnota zanedbatelná. Velikost výstupního napětí na fotodiodě závisí na nastavení pracovního bodu fotodiody (viz předchozí obr. 22). Velikosti výstupních napětí fotodiód, při nastavení nejvyššího výkonu, však bohužel nedosahují příliš velkých hodnot (v rozmezí 0,3 až 0,6 V). Zde nastává problém s dalším zpracováním napětí, protože DC/DC step-up konvertory potřebují ke stabilní funkčnosti a adekvátní účinnosti napětí vyšší. Pracovní bod fotodiody tedy musí být nastaven s určitým kompromisem mezi výstupním výkonem a napětím.



Obr. 24: Závislosti citlivosti na vlnové délce nejpoužívanějších materiálů fotodiód. [14]

2.3.2 Fotovoltaický článek

Fotovoltaický článek (FV) se skládá z jedné nebo více fotodiód, pracujících ve fotovoltaickém režimu. Světlo dopadající na takovýto článek generuje volné nosiče náboje elektron-díra, které vytváří fotoproud I_{ph} . Hodně vyráběných FV se skládá z více mikro-FV polí, což umožní zvýšit výstupní napětí článku. Na obr. 25 je zobrazen náčrt běžného uspořádání čtyř mikro-FV polí v jednom komerčně dostupném FV poli. Pro srovnání velikostí je ve stejném měřítku načrtnuto i optické vlákno s průměrem jádra 100 μm . Dle literatury [3] je tento typ vlákna běžně používán v kombinaci s tímto FV.



Obr. 25: Uspořádání komerčního FV pole v porovnání s 100 μm vláknem. [3]

Důležitým parametrem fotovoltaického článku je účinnost přeměny energie η_{FV} . Je definována jako poměr maximálního výstupního elektrického výkonu FV $P_{FV,max}$ ku průměrnému optickému výkonu dopadajícímu na FV, nebo ze vztahu: [3]

$$\eta_{FV} = \frac{P_{FV,max}}{P_{In}} \cdot 100 = \frac{U_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{In}} \cdot 100. [\%] \quad (15)$$

Kde U_{OC} je napětí na FV naprázdno, I_{SC} je proud nakrátko a FF je plnicí faktor (fill factor) fotovoltaického článku. Plnicí faktor je veličina udávaná v katalogu daného FV. Tento parametr hodnotí hustotu fotovoltaických článků v FV poli a zohledňuje mezery mezi nimi. [3]

Fotovoltaické články z křemíku a GaAs umí pracovat pouze na nízkých vlnových délkách do 1060 nm křemík a do 870 nm GaAs. Na této vlnové délce mají optická vlákna relativně velký útlum (viz předchozí obr. 11). Ale pokud by bylo napájené zařízení v malé vzdálenosti od optického zdroje (přibližně do 1 maximálně 2 km), mohl by se tento typ FV použít v kombinaci s MMF a s výkonnou LD. Pro provoz na vyšších vlnových délkách je nutné použít FV vyrobené z germania nebo z InGaAs. Existují však i jiné vhodné materiály.

2.4 Navázání optického výkonu

Zařízení z LD nebo LED je nutné navázat do optického vlákna tak, aby bylo převedeno do vlákna co nejvíce světelného výkonu vyzářeného zdrojem, a tedy byla účinnost navázání výkonu co nejvyšší. Na obr. 26 je uveden příklad přímého navázání optického záření z LED do vlákna se skokovou změnou indexu lomu. Jak je z obrázku patrné do vlákna vstoupí pouze paprsky, které mají menší úhel dopadu od osy vlákna na rozhraní vzduch-vlákno než již dříve zmíněný akceptační úhel vlákna. Akceptační úhel vlákna přímo

souvisí s velikostí numerické apertury vlákna a na jejím základě lze vypočítat velikost optického výkonu navázaného do vlákna. Velikost tohoto výkonu tedy je: [6]

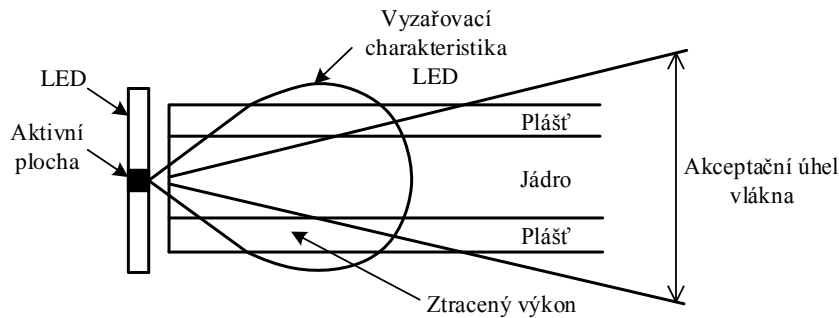
$$P_{\text{Fiber}} = P_S \cdot (NA)^2, [\text{W}] \quad (16)$$

kde P_S je velikost optického výkonu vyzářeného světelným zdrojem. Uvedený vzorec platí v případě, že poloměr jádra vlákna r je větší než poloměr emisní plochy zdroje r_S . V opačném případě je nutné použít vzorec: [6]

$$P_{\text{Fiber}} = \frac{r}{r_S} \cdot P_S \cdot (NA)^2. [\text{W}] \quad (17)$$

Poměr velikosti optického výkonu navázaného do vlákna a výkonu vyzářeného zdrojem záření, definuje účinnost navázání optického výkonu do vlákna: [6]

$$\eta_{\text{NV}} = \frac{P_{\text{Fiber}}}{P_S} \cdot 100. [\%] \quad (18)$$



Obr. 26: Znázornění přímého navázání optického záření do optického vlákna. [6]

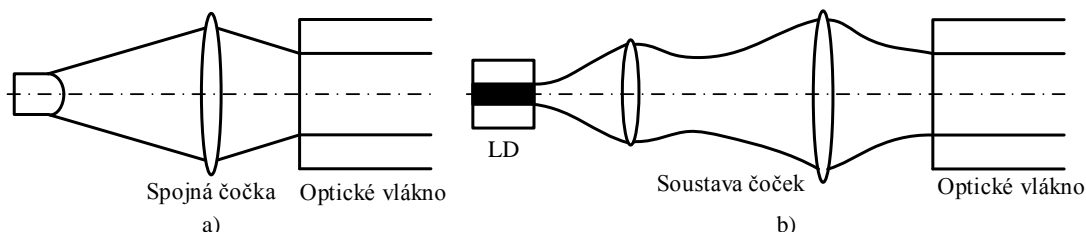
Dalším důležitým parametrem, který ovlivňuje velikost výkonu navázaného do vlákna, je odrazivost dopadajícího záření na rozhraní dvou opticky různých prostředí (zde konkrétně vzduch – jádro vlákna). Pro odrazivost při kolmém dopadu paprsků platí rovnice: [6]

$$R_O = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2, [-] \quad (19)$$

kde n_0 je index lomu vzduchu a n_1 je index lomu jádra vlákna. Konkrétně na rozhraní vzduch – skleněné jádro vlákna je velikost odrazivosti 3,4 %. To znamená, že 3,4 % dopadajících paprsků se do vlákna nenaváže a je odraženo zpět. [6]

Účinnost navázání výkonu přímo z LD nebo LED do vlákna není vysoká (přibližně 10 %), proto je nutné použít nějaký druh optického zaměřovače. Nejjednodušším příkladem je použití spojné čočky (viz obr. 27 a)), která efektivněji zaměří světelné paprsky z LED do vlákna. Je možné také využití soustavy dvou nebo více čoček (viz obr. 27 b)), u které účinnost navázání výkonu z LD může dosáhnout velikosti až 40 %. [15] Účinnost navázání výkonu však stoupá s rostoucím průměrem jádra vlákna. Sestavení takovýchto soustav by v praktické aplikaci PoF bylo příliš náročné na přesnost

umístění čoček, a hlavně by zabíralo spoustu místa (složitě držáky čoček a vlákna s posuvnými kolejnicemi). Také jsou běžně prodejné takzvané vláknové kolimátory, které obsahují mnohem složitější optickou soustavu a díky tomu mají také mnohem větší účinnosti navázání optického výkonu do vlákna (až 95 %). Velkou výhodou použití kolimátoru je, že jej lze pomocí vhodného typu optovláknového konektoru propojit přímo s optickým vláknem.



Obr. 27: Navázání optického výkonu do vlákna pomocí a) spojně čočky, b) systému čoček. [15]

Výkon z vláknového laseru je nutné nějakým způsobem převést z aktivního vlákna do přenosového vlákna, což lze uskutečnit například pomocí optovláknového konektoru. Někteří výrobci také nabízejí lasery, na kterých je buď napevno navázán kousek optického vlákna s optovláknovým konektorem nebo přímo obsahují nějaký typ konektoru pro usnadnění navazování výkonu do přenosového vlákna.

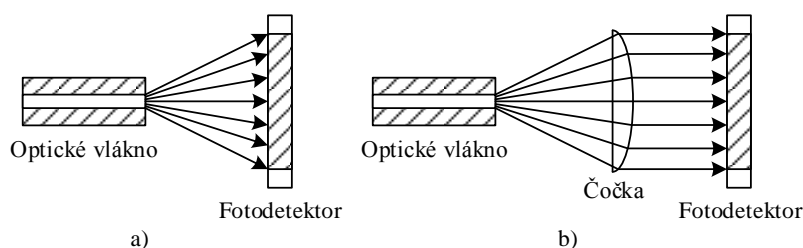
Existují dvě hlavní skupiny optovláknových konektorů. První skupina využívá čočkový systém k zaostření světelného svazku (respektive navázání optického výkonu) spojovaných vláken. Výhodné u této skupiny konektorů je, že vydrží mnohem větší počet spojení a rozpojení. Naopak jejich nevýhoda spočívá v nutnosti použití přených čoček, které jsou drahé, a proto se tento druh konektorů moc nepoužívá. Druhá skupina konektorů využívá mechanické vedení vlákna například pomocí vodícího kolíku a trubky nebo pomocí v-drážky. U tohoto typu konektorů je důležité, aby se spojovaná vlákna navzájem nedotýkala. Důvodem je, že při častém spojování a rozpojování dochází k nadměrnému opotřebení styčných ploch a tím i ztrátě kvality spoje. Také je důležité, aby spojovaná vlákna nebyla od sebe příliš daleko, neboť pak dochází ke ztrátám způsobeným difrakčním rozptylem paprsků ve spoji. Aby měl konektor co nejmenší difrakční ztráty, je nutné mezeru mezi spojovanými vlákny udělat širokou kolem 10 % velikosti průměru jádra vlákna. [8] Spojovaná vlákna musí také být přesně osově vyrovnána, aby nedocházelo ke ztrátám způsobeným radiální nebo úhlovou odchylkou spojovaných vláken. Je vyráběna spousta typů konektorů. Asi nejpoužívanější typy jsou konektory uvedené v tab. 3. V tabulce jsou také uvedeny hodnoty vložených útlumů a odrazivosti konektorů. Reálné hodnoty útlumů a odrazivosti však bývají vyšší.

Tab. 3: Typické parametry používaných optovláknových konektorů. [8]

Označení	FC	ST	SC	SMA
Vložený útlum [dB]	0,2	0,4	0,2	0,25
Odrzivost [dB]	50	50	50	30

Navázání optického výkonu z vlákna na fotodetektor by mohlo být provedeno přímo (viz obr. 28 a)) nebo přes ploskovypouklou čočku (viz obr. 28 b)). Ploskovypouklá čočka

zajistí, že optický výkon vyzářený z vlákna dopadá na fotodetektor rovnoběžně a rovnoměrněji, a tím i stoupá účinnost přeměny optické energie na elektrickou. Využití čočky má také výhodu v tom, že příliš nezáleží na tom, do jaké vzdálenosti od vlákna bude fotodetektor umístěn, pouze je nutné správně umístit čočku. Důležité je také dodržet maximální velikost optického výkonu, který může na fotodetektor dopadat, aby jednak nebyl poškozen nebo saturován. Také je nutné rozložit dopadající paprsky na fotodetektor co nejvíce rovnoměrně, aby nedocházelo ke zničení lokálních částí fotodetektoru. Další možností navázání optického výkonu na fotodetektor je koupě fotodiody, která přímo obsahuje konektorovou spojku. Využitím takového typu fotodiody se lze vyhnout konstrukčním komplikacím s navazováním optického výkonu, tím i zjednodušit návrh přijímací části zdroje PoF a také zmenšit její velikost.



Obr. 28: Navázání optického výkonu z vlákna na fotodetektor.

2.5 DC/DC konvertor

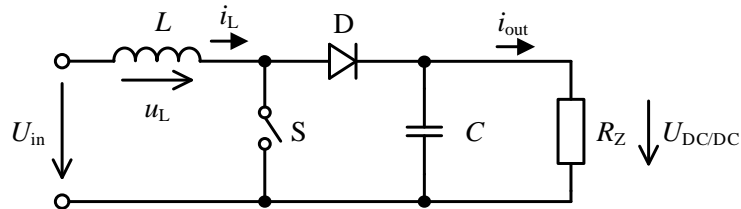
Protože výstupní napětí vytvářené fotodiodou nebo FV je ve většině případů nízké hodnoty, je třeba toto napětí zvýšit na hodnotu chtěného napětí, kterým bude možné napájet připojené elektronické obvody. K tomuto účelu mohou posloužit zmíněné DC/DC konvertory nebo step-up konvertory, což jsou v podstatě DC/DC konvertory zvyšující napětí. Důležitými parametry DC/DC konvertorů jsou:

- Rozsah vstupního operačního napětí U_{in}
- Vstupní startovací napětí (Start-Up Voltage)
- Velikost výstupního napětí $U_{DC/DC}$ (případná možnost nastavení)
- Účinnost konvertoru $\eta_{DC/DC}$
- Mezní hodnoty vstupního a výstupního proudu
- Velikost vstupního odporu

K vysvětlení principu funkčnosti step-up DC/DC konvertoru je použito jednoduché zapojení z literatury [16] (viz obr. 29). Činnost konvertoru je rozdělena na dvě fáze. V první fázi je spínač S sepnut, na cívce L se nachází napětí U_{in} a hromadí se na ní energie ve formě magnetického pole spojeného s proudem i_L . Dioda je vůči výstupu zapojena v závěrném směru a v této fázi slouží k oddělení vstupu konvertoru od výstupního napětí $U_{DC/DC}$. Po uplynutí času t_{on} je spínač S rozepnut a obvod přechází do druhé fáze. Ve druhé fázi je na cívce napětí $U_{in} - U_{DC/DC}$, dioda je zapojena v propustném směru a propouští energii nahromaděnou na cívce plus energii dodávanou ze vstupu ve formě proudu na výstup. Po uplynutí času t_{off} je spínač znovu sepnut a děj se opakuje. Dioda se považuje za ideální a nevzniká na ní úbytek napětí. Kondenzátor C slouží ke stabilizaci

výstupního napětí a měl by mít vysokou hodnotu. Pro ustálený stav v jedné periodě platí rovnice: [16]

$$U_{in} \cdot t_{on} + (U_{in} - U_{DC/DC}) \cdot t_{off} = 0. \quad (20)$$



Obr. 29: Step-up DC/DC konvertor. [16]

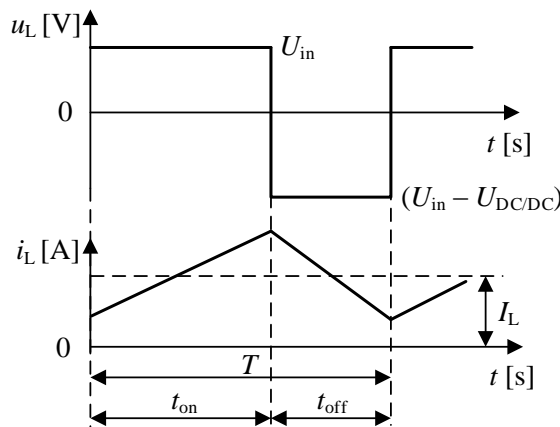
Na obr. 30 jsou zobrazeny časové průběhy napětí a proudu na cívce. Cívka je uvažována jako ideální a proud na ni narůstá lineárně. Po úpravě rovnice (20) a zavedení střídy: [16]

$$D = \frac{t_{on}}{T}, [-] \quad (21)$$

dostaneme rovnici pro výstupní napětí: [16]

$$U_{DC/DC} = U_{in} \cdot \frac{1}{1-D}. [V] \quad (22)$$

Změnou střídy D je možné řídit velikost výstupního napětí. Rovnice však odpovídá ideálnímu konvertoru s ideální diodou a cívkou. Reálně by takovýto obvod měl velmi malou účinnost, a proto takovýto konvertor by byl pro aplikaci PoF nepoužitelný. Nehledě na fakt, že by se musel použít nějaký řídicí obvod ke spínání spínače. Tento obvod by bylo třeba také napájet a uvedený DC/DC měnič by měl ještě menší účinnost. Z tohoto důvodu nemá cenu stavět vlastní měnič z diskretních součástek, protože na trhu jsou dostupná integrovaná řešení dosahující vynikajících parametrů.

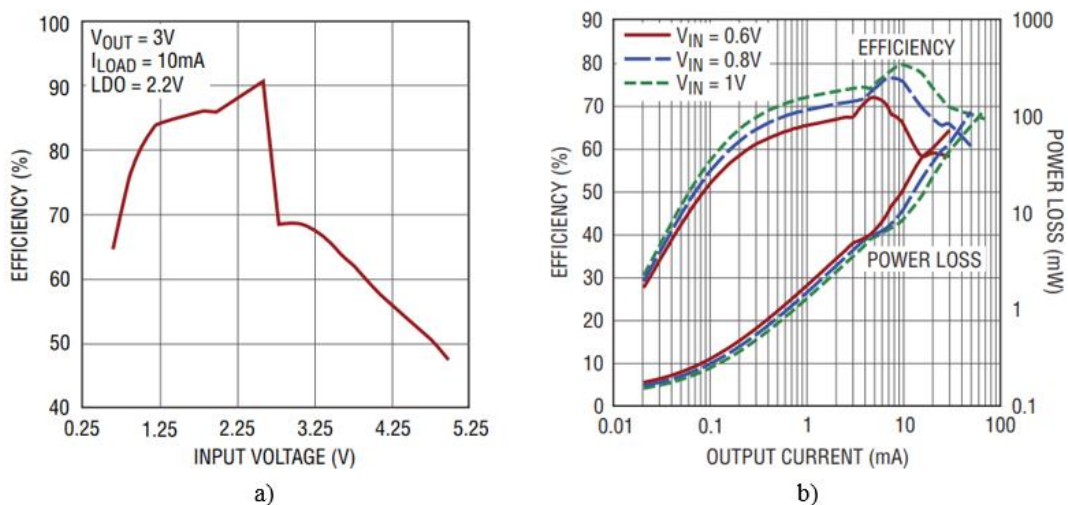


Obr. 30: Princip funkčnosti step-up DC/DC konvertoru. [16]

Dostupné komerční step-up DC/DC konvertory mají mnohem lepší účinnosti, jsou autonomní a stačí jim nízké startovací napětí. Například lze použít DC/DC step-up konvertor od firmy Linear Technology LTC3105 [17] nebo od firmy Texas Instrument konvertor TPS61200 [18].

2.5.1 Step-up DC/DC konvertor LTC3105

Vysoce účinný step-up DC/DC konvertor LTC3105 [17] umí pracovat se vstupním napětím od 225 mV do 5 V. Konvertor disponuje nízkým startovacím napětím 250 mV a má integrovanou funkci maximum power point control (MPPC). Tato funkce umožňuje step-up konvertoru pracovat s nízkým vstupním napětím, které je dodáváno z vysoko-impedančního zdroje energie, jako je například FV. Integrovaný obvod také obsahuje pojistku proti přehřátí. Výstupní napětí konvertoru je nastavitelné pomocí dvou externích rezistorů v rozmezí 1,6 až 5,25 V. Graf na obr. 31 a) ukazuje závislost účinnosti konvertoru na změně vstupního napětí. Z grafu je patrné, že konvertor má nejvyšší účinnost, pokud se na jeho vstupu nachází napětí o hodnotě přibližně v rozmezí od 1 do 2,5 V. Charakteristiky uvedené na obr. 31 b) zobrazují závislosti účinnosti a výkonových ztrát na výstupním proudu konvertoru, při rozmítání vstupního napětí. Charakteristiky platí při nastavení výstupního napětí konvertoru 3,3 V. Z charakteristiky vyplývá, že se tento konvertor vyplatí provozovat při výstupních výkonech přibližně do 33 mW (odpovídá výstupnímu proudu 10 mA), po překročení této hodnoty se velmi razantně zvýší výkonové ztráty konvertoru a klesá tak jeho účinnost.

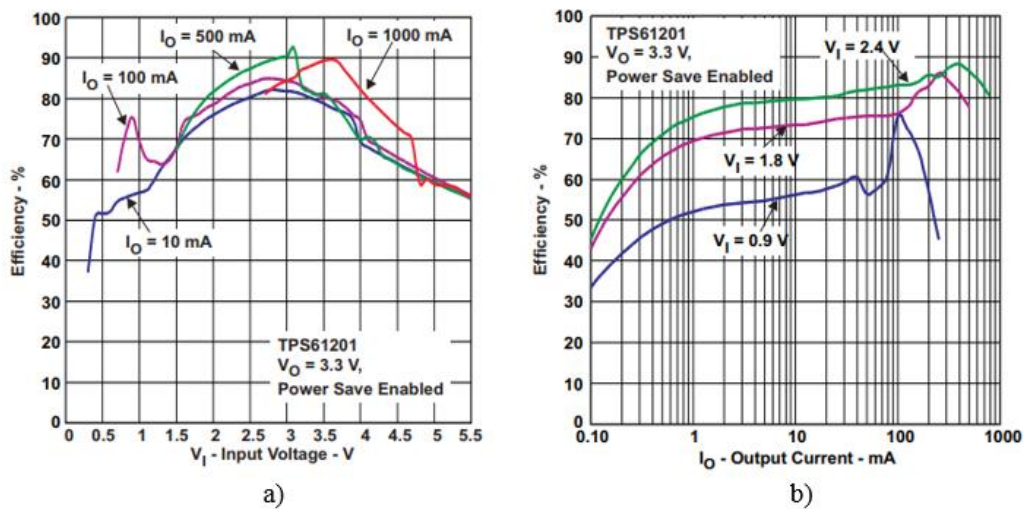


Obr. 31: Účinnosti a výkonové ztráty konvertoru LTC3105 v závislosti na a) vstupním napětí, b) výstupním proudu. (převzato z katalogového listu: [17])

Funkce MPPC umožňuje uživateli nastavit optimální pracovní bod připojeného FV. Funkce MPPC dynamicky reguluje průměrný vstupní proud, aby bylo zabráněno driftu vstupního napětí mimo nastavenou hranici. Pokud je vstupní napětí vyšší než nastavená hodnota, zvyšuje se vstupní proud, dokud vstupní napětí neklesne na požadovanou hodnotu. Naopak pokud vstupní napětí klesne pod hodnotu nastavenou funkcí MPPC, vstupní proud se sníží tak, aby vstupní napětí stouplo zpět na požadovanou úroveň. [17]

2.5.2 Step-up DC/DC konvertor TPS6120x

Konvertor TPS6120x [18] je primárně navržen k poskytnutí stálého napájecího napětí z nízkonapěťových alkalických, NiCd, NiMH, Li-Ion nebo Li-polymer akumulátorů, ale dá se také využít ke konverzi nízkých napětí z FV. Startovací napětí konvertoru je dle katalogu součástky 0,5 V a konvertor po zahájení činnosti umí pracovat se vstupním napětím od 0,3 do 5,5 V. Účinnost konvertoru v závislosti na velikosti vstupního napětí je uvedena na obr. 32 a). Texas Instrument nabízí tři typy konvertoru. U prvního typu se zkratkou TPS61200 [18] lze velikost výstupního napětí nastavit pomocí odporového děliče v rozsahu 0,8 až 5,5 V a u dalších dvou typů je výstupní napětí nastavené přímo v čipu součástky a to 3,3 V u TPS61201 a 5 V u TPS61202 [18]. Při nízkých vstupních proudech přejde konvertor do takzvaného Power save módu, který udrží vysokou účinnost konvertoru ve velkém rozsahu výstupních proudů (viz obr. 32 b)).



Obr. 32: Účinnosti konvertoru TPS61201 v závislosti na a) vstupním napětí, b) výstupním proudem. (převzato z katalogového listu: [18])

3 SROVNÁNÍ EXISTUJÍCÍCH ŘEŠENÍ

V této kapitole je uvedeno několik komerčních zařízení PoF. Zařízení jsou primárně určena k přenosu energie. Jeden z uvedených systémů má i jinou funkční vlastnost.

3.1 RLH Industries Power Over Fiber System

Americká firma RLH Industries [19] má na trhu PoF systém skládající se z výkonného vysílače, přijímací karty a šesti mnohovidových optických vláken. Energie je přenášena pomocí tří MMF s průměrem jádra 62,5 μm a pláště 125 μm . Zařízení využívá super kondenzátory k zajištění stabilizovaného a konstantního výstupního napětí. Systém je primárně určen k vzdálenému napájení síťových prvků s nízkou spotřebou energie. Hliníková konstrukce vysílače PoF (viz obr. 33 a)) je stavěna k montáži do datového rozvaděče („racku“). Vysílač má na předním panelu LED indikátory, které hlásí stav systému. Jednotka vysílače obsahuje dvě výkonné LD a jednu přijímací fotodiodu určenou k příjmu zpětné vazby z přijímače. Karta přijímače (viz obr. 33 b)) obsahuje dva fotovoltaické převodníky. Přijímač PoF také posílá vysílači po třetím optickém vlákne informaci o stavu výstupního napětí a v případě přerušení kontinuity vláken vyšle signál k bezpečnostnímu vypnutí. Jedno zařízení PoF poskytne až 1 W výkonu ve vzdálenosti 10 m od vysílače při napětí 24 V. Výkon však klesá se vzdáleností. Ve vzdálenosti 1 km od vysílače je výstupní výkon zařízení přibližně 0,3 mW. Ke zvýšení výstupního výkonu umožňuje zařízení sériové nebo paralelní propojení několika těchto systémů. Výrobce udává parametry: [19]

- Pracovní vlnová délka: 830 nm
- Podporovaný typ vláken: MMF (62,5 / 125 μm)
- Typ konektorů: ST
- Výstupní napětí: 24 V DC
- Max. výstupní výkon: 1,08 W ve vzdálenosti 10 m
- Spotřeba: 24 až 48 V DC, max. 75 W



Obr. 33: PoF systém od firmy RLH Industries a) vysílač, b) přijímač. [19]

3.2 JDSU PPM-5 Photonic Power Module

JDSU PPM-5 [20] využívá k přenosu energie jedno MMF (viz obr. 34). Zařízení poskytuje napájecí napětí 5 V na vzdálenost 0,5 km nebo i více. Dle výrobce může modul dodávat 0,5 až 1 W elektrického výkonu. Vysílací modul obsahuje rozhraní ke sledování výstupního výkonu a teploty laseru. Parametry zdroje PoF uváděné výrobcem: [20]

- Pracovní vlnová délka: 750 až 850 nm nebo 900 až 1000 nm (dle konfigurace)
- Typ vlákna: MMF (62,5 nebo 100 μm)
- Výstupní napětí: 5 V DC
- Max. výstupní výkon: od 0,5 do 1 W ve vzdálenosti 500 m
- Vstupní napětí: 5 V DC



Obr. 34: PoF modul JDSU PPM-5. [20]

3.3 MH GoPower Power over Fiber Platform

MH GoPower nabízí Power over Fiber Platform (PoFP) [21], která pomáhá návrhářům vytvářet vlastní systémy napájené zdrojem PoF. Zařízení obsahuje hardwarovou a softwarovou platformu založenou na systému Arduino. Ovládací modul (viz obr. 35 vlevo) obsahuje 1 W laser, který dodává energii přes jedno MMF do sensorového modulu (viz obr. 35 vpravo). Komunikace mezi moduly probíhá po dvojici MMF. Sensorový modul obsahuje sběrnice SPI, I2C a USB k připojení sensorů, které mohou mít spotřebu až 250 mW a pracovní napětí 3,3 a 5 V. Parametry systému PoFP uváděné výrobcem: [21]

- Pracovní vlnová délka: 900 až 1000 nm
- Typ vlákna: MMF (62,5 μm)
- Numerická apertura vlákna: 0,27
- Typ konektorů: FC
- Výstupní napětí: 3,3 V $\pm 10\%$ nebo 5 V $\pm 20\%$
- Max. výstupní výkon: až 0,25 W ve vzdálenosti 3 m
- Doporučené vstupní napětí: 6 V DC



Obr. 35: PoF systém od společnosti MH GoPower. [21]

4 NÁVRH TYPICKÉHO ŘEŠENÍ SYSTÉMU POF

Tato kapitola se bude věnovat popisu možného návrhu optické části systému PoF. Jedná o komplexní řešení, ve kterém se navzájem podmiňuje a ovlivňuje více parametrů a vlastností jednotlivých komponentů. Aby měl systém PoF co největší účinnost, je tedy třeba vhodně sladit jednotlivé komponenty. Také je důležité brát v potaz dostupnost součástí, které jsou potřebné k sestavení systému. Rozbor návrhu je členěn do tří kapitol a čtvrtá kapitola obsahuje dva příklady teoretického návrhu optické části zdroje PoF.

4.1 Optický zdroj

Při výběru optického zdroje je důležité se zaměřit na jeho velikost vyzařovaného optického výkonu a účinnost přeměny energie. Tyto faktory však nejsou příliš důležité z hlediska funkčnosti systému, avšak vyzařovaný výkon nesmí být příliš nízký. Optický zdroj musí jít snadno navázat na optické vlákno s dostatečnou účinností. Jak již bylo zmíněno, jsou prodejné optické zdroje obsahující přímo nějaký typ optovláknového konektoru. Použití optovláknového konektoru k navázání optického výkonu do vlákna se jeví jako nejpříjemnější volba s dobrou účinností navázání výkonu. Nejvíce limitujícím faktorem při výběru optického zdroje pro zdroj PoF je jeho cena. Levné LED diody s optovláknovým konektorem nemají dostatečný výstupní výkon (pouze jednotky mW) a většina výkonných LD (obsahující optovláknový konektor) převyšují přijatelnou cenu. Také je nutné se zaměřit na způsob chlazení optického zdroje, protože při vysokých vyzařovacích optických výkonech vznikají i velké tepelné ztráty. Některým laserovým zdrojům stačí pouze pasivní chladič, ale spousta z nich vyžaduje k efektivní funkčnosti a delší životnosti využití aktivního chlazení. Aktivní chlazení potřebuje ke své funkčnosti další řídicí obvody a vhodná LD obsahující nějaký typ detektoru určený k řízení aktivního chlazení (například termistor zabudovaný přímo v čipu LD).

Asi nejzásadnějším parametrem je pracovní vlnová délka optického záření, kterým bude přenášen výkon. Vhodná pracovní vlnová délka optického zdroje, a tedy i celého systému PoF je také závislá na použitém přenosovém vlákne a dostupném fotodetektoru. Také velmi záleží na tom, jaká částka je investována do zařízení. Nejčastější vlnové délky prodávaných výkonných zdrojů optického záření (používaných například k čerpání vláknových laserů, v medicíně nebo v průmyslových aplikacích) jsou v blízkém okolí 800, 950, 1050 nebo 1480 nm. Kterou z těchto vlnových délek je nejvýhodnější použít, závisí na více faktorech. K vyzařování do MMF SI s větším průměrem jádra lze výhodně použít LD zdroje určené například k čerpání vláknových laserů s vlnovou délkou kolem 800 nebo 950 nm. Vlnová délka kolem 1480 nm se spíše hodí k vyzařování do tenkých SMF vláken, hlavně kvůli nízkému útlumu SMF vláken na této vlnové délce. Nízké, očima viditelné vlnové délky (přibližně 400 až 750 nm) se pro přenos výkonu vláknem moc nehodí, protože běžná optická vlákna na těchto vlnových délkách mají příliš velký útlum.

4.2 Přenosové vlákno

Volba typu přenosového vlákna závisí na tom, jaký výkon je od zdroje PoF požadován a v jaké vzdálenosti se napájený obvod nachází. Také je vhodné vybrat vlákno s vysokou hodnotou numerické apertury a silným jádrem, aby bylo možné do něj co nejefektivněji navázat optický výkon.

Obecně platí, že na dlouhé vzdálenosti (větší než stovky metrů) je výhodnější použít SMF s malým průměrem jádra, protože SMF mají na pracovních vlnových délkách menší hodnoty útlumu. Bohužel takovýmto vláknem lze přivádět díky jejich malému průměru jádra jen malé optické výkony. Většina SMF má i nízkou hodnotu numerické apertury, a proto není snadné do nich navázat optický výkon. Na kratší vzdálenosti (menší než stovky metrů) je tedy výhodnější využít MMF SI s velkým průměrem jádra kvůli snazšímu navázání optického výkonu do vlákna (vysoká NA). Vyšší průměr jádra také dovolí přenášet vyšší výkony. Jak již bylo zmíněno v předešlém textu, lze například 200 μm výkonovým vláknem bezpečně přenést až 200 W optického výkonu, tudíž pro účely systému PoF toto není limitující faktor. Není dobré to však s velikostí průměru vlákna přehánět, protože vlákna s velkým průměrem jádra mají vyšší hodnoty útlumu. Ideální velikost průměru jádra MMF SI by mohla být 62,5 až 600 μm , v závislosti na tom, v jaké vzdálenosti je napájené zařízení a jaké výkony je nutné přenášet.

Pokud tedy uvažujeme o napájení zařízení, které je vzdálené pouze desítky metrů, je tedy lepší využít MMF SI s průměrem jádra například 105 μm . Vyšší hodnota útlumu vlákna se na této vzdálenosti příliš neprojeví a bude možné převést větší optické výkony než tenkým SMF.

4.3 Fotodetektor

Nejkritičtější částí zdroje PoF z hlediska jeho celkové účinnosti je fotodetektor. Fotodetektor musí být vybrán s ohledem na jeho maximální výkonové zatížení. Musí také být vyroben z materiálu, který má vyhovující citlivost na pracovní vlnové délce systému PoF. Tedy musí mít dostatečnou účinnost přeměny optické energie na elektrickou.

Jako nejvýhodnější a nejjednodušší možnost se nabízí použití fotodiod s integrovaným optovláknovým konektorem. Bohužel takovéto fotodiody nejsou primárně stavěné na přeměnu energie, ale pouze na detekci přenášených signálů. Tyto fotodetektory obsahují pouze maloplošnou ve většině případů rychlou PIN fotodiodu, která nedokáže převést potřebné množství energie ve formě fotonů na elektrickou energii. Další možnost je použití drahých velkoplošných fotodiod, které by mohly převést výkonu více. Takovéto fotodiody jsou určeny k plošné detekci například z optických čidel a vysoký vyzařovaný výkon z optického vlákna by je mohl poškodit.

Zajímavou a zároveň levnější volbou by bylo použití malých fotovoltaických článků (FV), které jsou vyráběné přímo k účelu přeměny optického záření na elektrickou energii. FV jsou levné a dostupné v mnoha různých variantách. Ve většině případů se vyrábí z monokrystalického křemíku, které mají nejvyšší kvantovou účinnost v rozsahu vlnových délek 400 až 900 nm. Jejich účinnost přeměny energie se však pohybuje pouze kolem 20 %, ale oproti malým fotodiodám mají vyšší hodnoty výstupního napětí, se kterým by se dále lépe pracovalo. Také, jak již bylo zmíněno, dokáží díky své velké

fotocitlivé ploše převést více výkonu. Problém je ve fyzickém tvaru těchto článků, protože pro větší účinnost přeměny energie je nutné osvítit nejlépe celou plochu článku. Tento problém by mohl být řešitelný výběrem FV, který má aspoň částečně kruhovou fotocitlivou plochu.

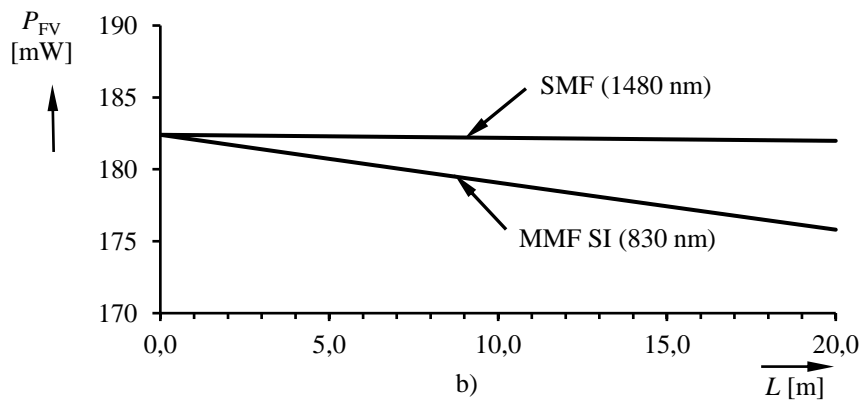
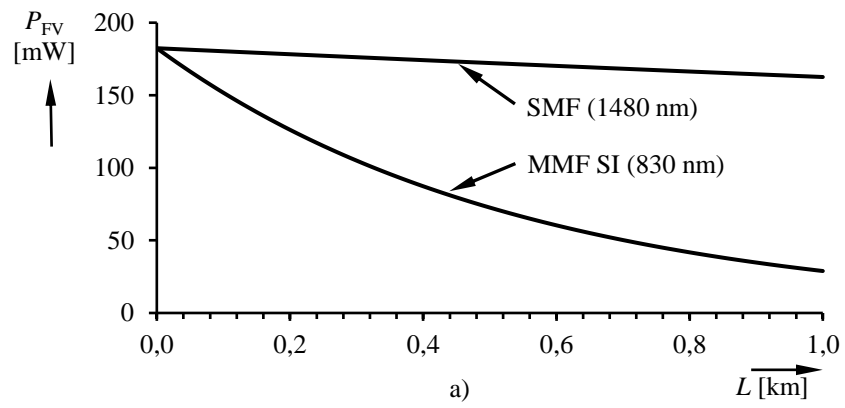
Nejideálnější by bylo použití malých FV z materiálů GaAS, GaSb nebo AlGaAS, které mají účinnost přeměny optické energie na elektrickou vyšší než 50 % (viz literatura [22] a [23]). Bohužel takovéto FV nejsou běžně prodejné anebo je možné si je nechat vyrobit na zakázku, což se podepíše i na jejich pořizovací ceně.

4.4 Teoretický návrh optické části zdroje PoF

Jsou uvažovány dvě různé optické linky, jedna s přenosem výkonu pomocí SMF s malým průřezem jádra a druhá pomocí MMF SI s velkým průřezem jádra. Pomocí rovnic (1) až (4) je možné vypočítat jaký vliv má účinnost FV, útlum konektorů použitých v přenosové lince a také útlum samotného vlákna na velikost přenášeného výkonu. Rovnice však nezahrnují velikost účinnosti navázání optického záření z LD do vlákna, pro výpočet bude tedy uvažována 100 % účinnost navázání optického výkonu (tedy $P_{LD} = P_{Fiber}$). Pro výpočet závislostí jsou uvažovány parametry optické linky uvedené v tab. 4. Je zde uvažováno použití konektorů typu FC a fotovoltaického článku s účinností 20 %. Charakteristiky vykreslené na obr. 36 znázorňují, jaké výkony je teoreticky možné převést systémem PoF v závislosti na vzdálenosti napájeného zařízení od optického zdroje. Ze závislosti (viz obr. 36 a)) je patrný vliv poměrně vysokého útlumu MMF SI vlákna při přenosu výkonu na velké vzdálenosti. Pokud bude však napájené zařízení umístěno jen několik metrů od optického zdroje, přenášený optický výkon MMF SI příliš neutlumí (patrné z obr. 36 b)). Velikost výstupního elektrického výkonu nejvíce ovlivní účinnost zde uvažovaného FV. Nahrazením FV nějakým jiným účinnějším typem fotodetektoru by bylo možné zdrojem PoF převést mnohem větší výkony.

Tab. 4: Parametry použité k výpočtu přenosové linky zdroje PoF.

Typ přenosového vlákna	SMF (MFD 9,5 μm)	MMF SI (200 μm)
Výkon optického zdroje P_{LD} [W]	1	1
Pracovní vlnová délka λ [nm]	1480	830
Útlum konektorů FC α_{Conn} [dB]	0,4	0,4
Útlum vlákna α_{Fiber} [dB]	0,5	8
Účinnost FV η_{FV} [%]	20	20



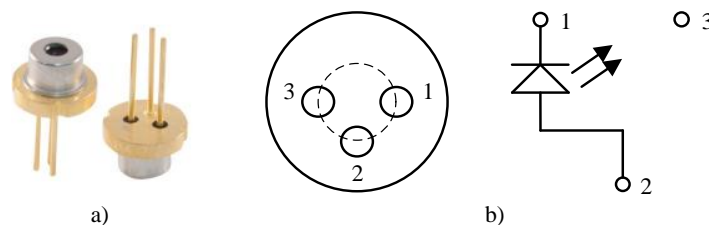
Obr. 36: Závislosti elektrického výkonu dodávaného FV jako funkce vzdálenosti od optického zdroje a) 1 km, b) 20 m.

5 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO ZDROJE POF

V této části práce bude podrobně popsán návrh experimentálního napájecího zdroje PoF. Také zde budou uvedeny důležité parametry použitých klíčových komponentů. V systému budou využity součástky s ohledem na jejich dostupnost a cenu. Bude brán zřetel zejména na účinnosti jednotlivých částí systému. Rozbor návrhu je členěn do pěti částí. První čtyři podkapitoly se věnují rozboru návrhu dílčích částí systému PoF a v poslední podkapitole budou stručně popsány celé navržené systémy PoF s odhadem jejich výkonových bilancí.

5.1 Optický zdroj

Jako zdroj výkonného optického záření byly vybrány dvě laserové diody. První z LD nese označení ADL-80V03TZ [24] a byla vybrána proto, že na své vyzářovací vlnové délce je to nejvýkonnější a zároveň cenově dostupná LD. Tato LD vyzářuje na infračervené vlnové délce 808 nm, což je vhodná vlnová délka pro efektivní šíření světla mnohovidovým optickým vláknem. Také dále použitý křemíkový fotovoltaický článek v navrženém systému PoF má na této vlnové délce vyhovující účinnost. Katalog udává maximální kontinuální výstupní optický výkon diody 500 mW. Na obr. 37 a) je vyobrazeno 5,6 mm pouzdro TO-typu této LD a obr. 37 b) naznačuje zapojení vývodů diody.



Obr. 37: Laserová dioda ADL-80V03TZ: a) Pouzdro [25], b) Zapojení vývodů [24].

Dle katalogových údajů uvedených v tab. 5 je možné vypočítat typický příkon laserové diody:

$$P_{0-LD} = U_{LD} \cdot I_{LD} = 1,9 \cdot 0,57 = 1,083 \text{ W.} \quad (23)$$

Z vypočtené hodnoty příkonu mohou být odhadnuty maximální tepelné ztráty LD:

$$P_{Z-LD} = P_{LD} - P_{0-LD} = 1,053 - 0,500 = 0,573 \text{ W.} \quad (24)$$

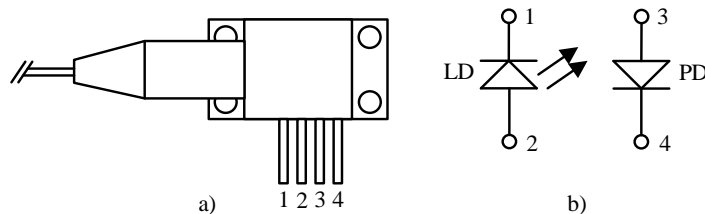
Přibližné tepelné ztráty do 0,573 W by měl být schopen odvést pasivní, například hliníkový chladič, a tak není třeba se zabývat problematikou aktivního chlazení. Také lze

z této hodnoty vypočítat přibližnou účinnost přeměny elektrické energie na optickou, která dosahuje až 47 %.

Tab. 5: Elektrické a optické vlastnosti LD ADL-80V03TZ ($T_p = 25 \text{ }^\circ\text{C}$). [24]

Parametr	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Jednotka	Podmínka
Vlnová délka záření	λ	805	808	811	nm	$P_{LD} = 500 \text{ mW}$
Prahový proud	I_p	-	120	-	mA	-
Pracovní proud	I_{LD}	-	570	-	mA	$P_{LD} = 500 \text{ mW}$
Pracovní napětí	U_{LD}	-	1,9	2,1	V	$P_{LD} = 500 \text{ mW}$
Diferenciální účinnost	η_D	0,8	1,2	-	W/A	$P_{LD} = 400\text{-}500 \text{ mW}$
Paralelní divergentní úhel	θ_p	-	8	11	$^\circ$	$P_{LD} = 500 \text{ mW}$
Kolmý divergentní úhel	θ_K	-	39	48	$^\circ$	$P_{LD} = 500 \text{ mW}$
Provozní teplotní rozsah pouzdra	T_p	-10	-	50	$^\circ\text{C}$	-

Druhá vybraná LD je mnohem výkonnější. Její výstupní optický výkon může dosahovat až 1,4 W. Pouzdro a zapojení jednotlivých vývodů LD je patrné z obr. 38. LD navíc obsahuje také monitorovací fotodiodu ke sledování výstupního výkonu optického záření. Bohužel tato LD vyzařuje na vlnové délce 980 nm, a tak nebude využito maximální kvantové účinnosti použitého křemíkového FV, umístěného na konci systému PoF. Oproti laserové diodě ADL-80V03TZ [24] má tato dioda napevno připojené 50/105 μm optické vlákno s konektorem typu FC, a tak bude mnohem snadnější efektivně navázat výstupní optický výkon do přenosového vlákna. Numerická apertura pevně navázaného vlákna na LD je rovna 0,22.



Obr. 38: Pouzdro a zapojení vývodů 1,4 W LD.

Maximální příkon LD vypočítaný z hodnot v uvedených v tab. 6 je:

$$P_{0-LD} = U_{LD} \cdot I_{LD} = 2,1 \cdot 2 = 4,2 \text{ W.} \quad (25)$$

Z vypočteného příkonu je patrné, že tepelné ztráty budou mnohem vyšší než u předešlého typu LD, tudíž by bylo vhodné při práci s touto diodou použít nějaký typ aktivního chladiče, který dokáže stabilizovat teplotu pouzdra LD na dané hodnotě. Jelikož v aplikaci PoF by neměla vadit fluktuace výstupního výkonu LD, bude využít pouze pasivní chladič.

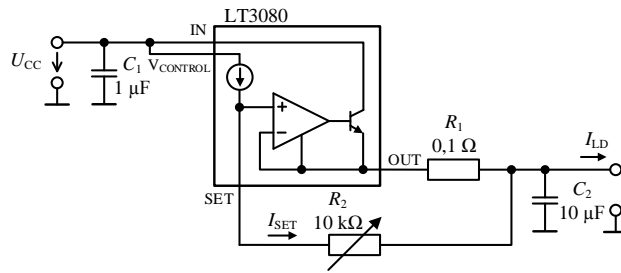
Tab. 6: Elektrické a optické vlastnosti 1,4 W LD ($T_p = 25 \text{ }^\circ\text{C}$).

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotka
Vlnová délka záření	λ	980 ± 3	nm
Prahový proud	I_p	0.4	A
Pracovní proud	I_{LD}	2	A
Pracovní napětí	U_{LD}	1,9 - 2,1	V
Diferenciální účinnost	η_D	0,9 - 1,1	W/A
Provozní teplotní rozsah pouzdra	T_p	- 20 ~ + 60	$^\circ\text{C}$
Typická účinnost přeměny energie	η_{LD}	40 - 50	%

Laserovou diodu je třeba vhodně napájet, nejlépe nějakým typem konstantního proudového zdroje, aby její výstupní optický výkon byl stabilní a nedošlo k nestabilitě celého systému PoF. Důležité je se zaměřit na velikost výstupního proudu obvodu, protože uvedené LD vyžadují poměrně vysoké budící proudy. K tomuto účelu by mohl vhodně posloužit lineární stabilizátor LT3080 [26]. Jedná se o stabilizátor s nízkým úbytkem napětí (tzv. drop-out voltage), a tak jeho ztrátový výkon je menší než u běžných stabilizátorů. Lineární stabilizátor byl využit z důvodu jednoduchosti zapojení a vyhovující velikosti výstupního proudu. Stabilizátor také poskytuje dostatečně stabilní budící proud pro LD, použitou v systému PoF. V zapojeních se spojenými vývody IN a $V_{CONTROL}$ je dle katalogu typická hodnota úbytku napětí rovna 1,35 až 1,6 V při plném proudovém zatížení. Stabilizátor lze zapojit jako zdroj konstantního proudu do 1 A (viz obr. 39). V tomto zapojení je možné změnou hodnoty potenciometru R_2 lineárně řídit velikost výstupního proudu dle rovnice:

$$I_{LD} \approx \frac{R_2 \cdot I_{SET}}{R_1}. [3] \quad (26)$$

Kde $I_{SET} = 10 \text{ } \mu\text{A}$ je konstantní proud tekoucí z vývodu SET uváděný v katalogu součástky. V uzlu u výstupní svorky budícího obvodu byl přírůstek proudu I_{SET} ve výpočtu zanedbán, protože má malou hodnotu vzhledem k výstupním proudům proudového zdroje. Problém by mohl nastat při přeladování výstupního proudu pomocí potenciometru R_2 . Pokud by jezdec potenciometru na krátkou dobu odskočil od odporové dráhy, stoupl by výstupní proud na maximální hodnotu a mohl by zničit připojenou LD. V reálném zapojení bude použita místo potenciometru R_2 řada pěti rezistorů, mezi kterými bude možné přepínat pomocí zkratovacích propojek (takzvaných jumperů). Takto upravené schématické zapojení je uvedené v příloze společně s návrhem desky plošných spojů (DPS). Hodnoty použitých rezistorů jsou 2,4; 3,6; 4,7; 5,6 a 6 k Ω (odpovídá $I_{LD} = 0,24; 0,36; 0,47; 0,56$ a 0,6 A).

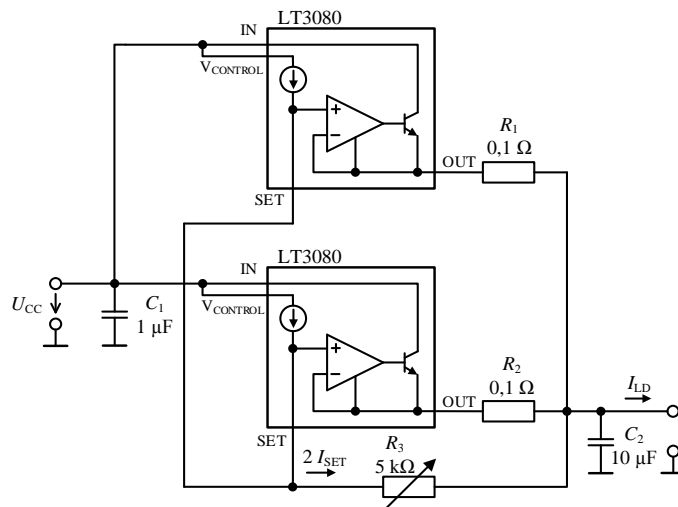


Obr. 39: Proudový zdroj s jedním LT3080 a výstupním proudem 0 až 1 A. [26]

Stabilizátor má výhodu v možnosti zapojení více integrovaných obvodů paralelně a tím několikanásobně zvýšit výstupní proud I_{LD} . Dle katalogu součástky je možné propojit vývody SET do jednoho uzlu, což umožní řízení více integrovaných obvodů LT3080 [26] pomocí jednoho proměnného rezistoru. Na obr. 40 je zobrazeno paralelní zapojení dvou LT3080 [26], u kterého lze výstupní proud lineárně řídit potenciometrem R_3 od 0 do 2 A dle rovnice:

$$I_{LD} \approx \frac{R_3 \cdot 2 \cdot I_{SET}}{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}. \quad [3] \quad (27)$$

Velikost I_{LD} je součtem velikostí proudů procházejících rezistory R_1 a R_2 . Výstupní napětí na vývodu OUT je díky propojení vývodů SET u obou stabilizátorů stejné, a tak je možné velikost I_{LD} vypočítat z paralelní kombinace těchto rezistorů. Vstupní kondenzátor C_1 v zapojení zvyšuje stabilitu napětí U_{CC} dodávaného ze zdroje napětí. Výstupní kondenzátor C_2 slouží ke zmenšení zvlnění výstupního proudu a poskytuje lepší přechodovou odezvu při větším proudovém zatížení. Nízká hodnota rezistorů R_1 a R_2 byla zvolena záměrně, aby nedocházelo k velkému úbytku napětí na tomto rezistoru, a tedy i k velkým výkonovým ztrátám. V reálném zapojení, které je s navrženou DPS uvedené v příloze, bude opět místo potenciometru využita řada pěti rezistorů s hodnotami 1,2; 2,4; 3,6; 4,7 a 5 kΩ (odpovídá $I_{LD} = 0,48; 0,96; 1,44; 1,88$ a 2 A).



Obr. 40: Proudový zdroj se dvěma LT3080 a výstupním proudem 0 až 2 A.

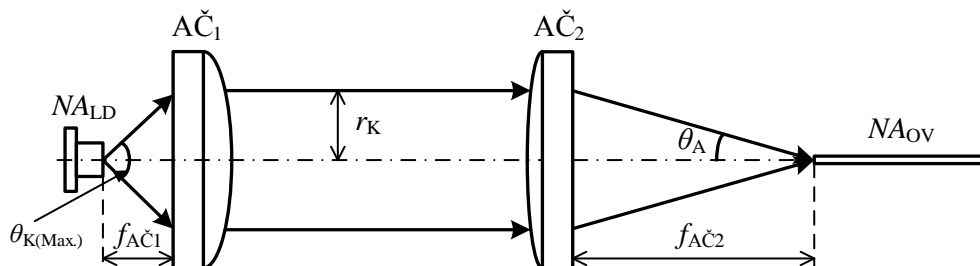
5.2 Přenosové vlákno

Pro přenos optické energie (optického výkonu) bude využito jedno ze dvou vybraných optických vláken. Bylo vybráno MMF SI AFS105/125Y [27] od firmy Thorlabs s nízkým obsahem iontů OH^- (low OH^-) hlavně kvůli jeho nízkému útlumu na vlnové délce 808 nm, kterou vyzařuje vybraná LD ADL-80V03TZ [24]. Klíčové parametry vlákna jsou uvedeny v tab. 7. Útlumy vlákna na pracovní vlnové délce systému PoF byly odečteny ze závislosti uvedené v katalogu AFS105/125Y [27]. Thorlabs udává, že přibližná hodnota plošného optického výkonu, která může být bezpečně navázána do vlákna s jádrem z oxidu křemičitého je 250 kW/cm^2 . Z toho vyplývá, že do tohoto vlákna s průměrem jádra $105 \mu\text{m}$ lze bezpečně navázat až $21,6 \text{ W}$ optického výkonu. Takže 500 mW LD nemůže vlákno poškodit.

Tab. 7: Vlastnosti optického vlákna AFS105/125Y. [27]

Materiál jádra/ krycího povlaku	Čistý oxid křemičitý/Akrylát
Pracovní teplota	$-40 \sim +85 \text{ }^\circ\text{C}$
Numerická apertura (NA)	$0,22 \pm 0,02$
Minimální poloměr ohybu – chvilkový	120 x poloměr pláště
Minimální poloměr ohybu – dlouhodobý	240 x poloměr pláště
Průměr jádra (d)	$105 \mu\text{m} \pm 2 \%$
Průměr pláště	$125 + 1 / - 3 \mu\text{m}$
Průměr krycího povlaku	$250 \mu\text{m} \pm 5 \%$
Útlum vlákna (α_{FiberdB}) na vlnové délce	3 dB/km (808 nm), 1,3 dB/km (980 nm)

Jelikož laserová dioda ADL-80V03TZ [24] nemá optovláknový konektor je třeba navrhnout optický zaměřovač, který by její výstupní optický výkon, co nejefektivněji navázal do vybraného vlákna AFS105/125Y [27]. V laboratorních podmínkách realizovatelná možnost pro experiment je použití soustavy dvou asférických čoček (AČ). Návrh soustavy je uvedený na obr. 41. Vhodnou AČ₁ se přemění divergentní paprskový svazek z LD na svazek kolimovaný a poté čočkou AČ₂ s vhodnou numerickou aperturou a ohniskovou vzdáleností se udělá konvergentní svazek na ozáření apertury jádra vlákna.



Obr. 41: Soustava AČ k navázání výkonu do optického vlákna.

Z údajů o LD uvedených v tab. 5 je možné vyčíst údaj o maximálním úhlu 48° vyzařovaného optického záření a z tohoto úhlu vypočítat numerickou aperturu LD: [28]

$$NA_{LD} \approx \sin\left(\frac{\theta_{K(\text{Max.})}}{2}\right) = \sin\left(\frac{48}{2}\right) \approx 0,41. \quad (28)$$

Na základě velikosti numerické apertury LD je možné vybrat kolimační AČ₁. Dle literatury [28] je vhodné použít čočku s přibližně dvojnásobnou hodnotou NA. Byla vybrána kolimační čočka od firmy Thorlabs C330TMD-B [29] s numerickou aperturou 0,7 a ohniskovou vzdáleností 3,1 mm. Čočka také vyhovuje z hlediska použité antireflexní vrstvy pro snížení odrazivosti, kterou má nejmenší v rozsahu vlnových délek 600 až 1050 nm. Dále je nutné vypočítat poloměr kolimovaného svazku: [28]

$$r_K = f_{AČ_1} \cdot \tan\left(\frac{\theta_{K(\text{Max.})}}{2}\right) = 3,1 \cdot \tan\left(\frac{48}{2}\right) \approx 1,38 \text{ mm}. \quad (29)$$

Průměr kolimovaného svazku je tedy 2,76 mm, a tudíž vybraná AČ₁ vyhovuje i z hlediska velikosti propustného průměru (Clear Aperture) čočky o katalogové hodnotě 3,84 mm.

Nyní je třeba provést fokusaci kolimovaného svazku k ozáření jádra optického vlákna. K tomuto účelu slouží fokusační čočka AČ₂. Nejdříve je nutné vypočítat velikost akceptačního úhlu vlákna, pod kterým musí být svazek navázán:

$$\theta_A \approx \sin^{-1}(NA_{OV}) = \sin(0,22) \approx 12,71^\circ. \quad (30)$$

Kde NA_{OV} je velikost numerické apertury vlákna AFS105/125Y [27] uvedený v tab. 7. Jelikož úhel navázání paprsků musí být menší než akceptační úhel, platí nerovnice:

$$\theta_A \geq \tan^{-1}\left(\frac{r_K}{f_{AČ_2}}\right). [^\circ] \quad (31)$$

Odvozením z (31) dostáváme nerovnici potřebnou k výpočtu velikosti vhodné ohniskové vzdálenosti čočky AČ₂:

$$f_{AČ_2} \geq \frac{r_K}{\tan \theta_A} = \frac{1,38}{\tan 12,71} \approx 6,12 \text{ mm}. \quad (32)$$

Je nutné vybrat čočku s větším propustným průměrem čočky, než je průměr konvergentního svazku paprsků a s větší ohniskovou vzdáleností než 6,12 mm. K dispozici je čočka s typovým číslem 46358 od společnosti Edmund Optics [30] s numerickou aperturou 0,25; ohniskovou vzdáleností 11 mm a propustným průměrem 5,5 mm.

Vstup do jádra optického vlákna je tedy nutné přesně umístit do ohniska této AČ₂. To je možné provést pomocí ideálně pěti-osého translačního manipulátoru. Ten zajistí lineární posun apertury jádra vlákna ve třech navzájem kolmých souřadných osách. Dále zajistí úhlový náklon podélné osy vlákna vůči podélné ose svazku podle dalších dvou, na sebe kolmých, souřadných os rotace. Pro realizaci byl vybrán tří-osý lineární manipulátor řady Nanomax společnosti Thorlabs doplněný platformou pro řízení náklonu podle dvou rotačních os. Důležité je také vlákno precizně zbavit primární ochrany a zalomit. Čelo optického vlákna musí být přísně rovné a kolmé k ose vlákna, aby nedocházelo ke ztrátám energie na rozhraní vzduch-jádro vlákna. Také musí být dodržena důsledná čistota při přípravě vlákna. Pokud se podaří navázat do vlákna aspoň

40 % optického výkonu z LD a katalogem udávaný maximální optický výkon LD ADL-80V03TZ [24] je korektní, bude dle (18) do vlákna navázáno kolem 200 mW optického výkonu. Délka optického vlákna, použitého v experimentu, je 1 m a dle rovnic (2) a (3) je možné vypočítat teoretickou hodnotu optického výkonu vyzářeného z konce vlákna na fotodetektor:

$$P_{\text{In}} = P_{\text{Fiber}} \cdot 10^{\left(-\frac{L \cdot \alpha_{\text{FiberdB}}}{10}\right)} = 200 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{\left(-\frac{0,001 \cdot 3}{10}\right)} \approx 199,9 \text{ mW}. \quad (33)$$

V tomto případě není použitý žádný optovláknový konektor, a tak se v rovnici s útlumem konektoru nepočítá. Při ozáření vlákna s 500 mW LD a účinností navázání výkonu 40 % se v 1 m dlouhém vlákne s útlumem 5 dB/km (dle vlastností vlákna v tab.7) ztratí pouze 0,1 mW optického výkonu.

Navázání výkonu z 1,4 W LD je mnohem snadnější, protože tato LD obsahuje optovláknový konektor typu FC a může být použita optovláknová konektorová spojka. Opět lze dle rovnic (2) a (3) vypočítat velikost optického výkonu na konci 1 m dlouhého vlákna:

$$P_{\text{In}} = P_{\text{Fiber}} \cdot 10^{\left(-\frac{L \cdot \alpha_{\text{FiberdB}}}{10}\right)} \cdot 10^{\left(-\frac{\alpha_{\text{Conn}}}{10}\right)} = 1,4 \cdot 10^{\left(-\frac{0,001 \cdot 1,3}{10}\right)} \cdot 10^{\left(-\frac{0,7}{10}\right)} \approx 1,19 \text{ W}, \quad (34)$$

kde platí $P_{\text{Fiber}} = P_{\text{LD}}$, protože velikost vyzářeného optického výkonu LD je výrobcem udáváno na výstupu 50 μm vlákna s konektorem typu FC. Velikost útlumu vlákna α_{FiberdB} byla vyčtena z tab. 7 a útlum konektorového spojení $\alpha_{\text{Conn}} \text{dB}$ pomocí konektorů typu FC je přibližně 0,7 dB. Výpočet (34) tedy zahrnuje ztráty vlivem útlumu optického vlákna AFS105/125Y [27] a konektorového spojení s konektory typu FC. Výstupní výkon na druhém konci vlákna by měl být utlumen přibližně o 0,21 W (při ozařování maximálním výstupním výkonem LD). Nejvíce výkonu je ztraceno na konektorovém spojení, avšak je tato metoda navázání mnohem účinnější než zaměřování paprsků pomocí čoček. Účinnost navázání optického výkonu pomocí konektorové spojky je tedy přibližně 85 %. V praktické realizaci nebude využito maximálního vyzářovacího výkonu LD, ale bude nalezena hodnota optického výkonu, která nebude saturovat použitý fotodetektor, aby nebyla zbytečně snížena účinnost systému PoF.

Navázání výkonu z LD ADL-80V03TZ [24] pomocí soustavy čoček do tenkého 105 μm vlákna pravděpodobně nebude příliš snadné a efektivní, proto bude otestován další silnější 1 m dlouhý patch kabel s konektory SMA od společnosti Thorlabs s označením M35L01 [31] obsahující MMF SI FT1000EMT [32]. Jedná se o vlákno s nízkým obsahem iontů OH^- (low OH^-), průměrem jádra 1000 μm a numerickou aperturou 0,39. Další důležité vlastnosti vlákna jsou uvedeny v tab. 8. Dle katalogu může být do vlákna navázáno až 5 kW optického výkonu.

Tab. 8 Vlastnosti optického vlákna FT1000EMT. [32]

Materiál jádra	Čistý oxid křemičitý
Materiál krycího povlaku	Tefzel
Pracovní teplota (Krycího povlaku)	- 65 ~ + 135 °C
Numerická apertura (NA)	0,39
Minimální poloměr ohybu – chvilkový	50 mm
Minimální poloměr ohybu – dlouhodobý	100 mm
Průměr jádra (d)	1000 $\mu\text{m} \pm 15 \mu\text{m}$
Průměr pláště	1035 $\mu\text{m} \pm 15 \mu\text{m}$
Průměr krycího povlaku	1400 $\mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$
Útlum vlákna (α_{FiberdB}) na vlnové délce	10 dB/km (808 nm)

Jelikož vlákno má jinou hodnotu numerické apertury je třeba přepočítat dle rovnice (30) velikost akceptačního úhlu vlákna, který je $\theta_A = 22,95^\circ$. Z tohoto úhlu je dle nerovnice (32) vypočítána vhodná ohnisková vzdálenost fokusační čočky $f_{A\check{C}2} \geq 3,26$ mm. Vypočtená ohnisková vzdálenost není větší než 11 mm, a tak lze použít stejnou fokusační čočku od společnosti Edmund Optics [30] jako v předešlém případě.

5.3 Fotodetektor

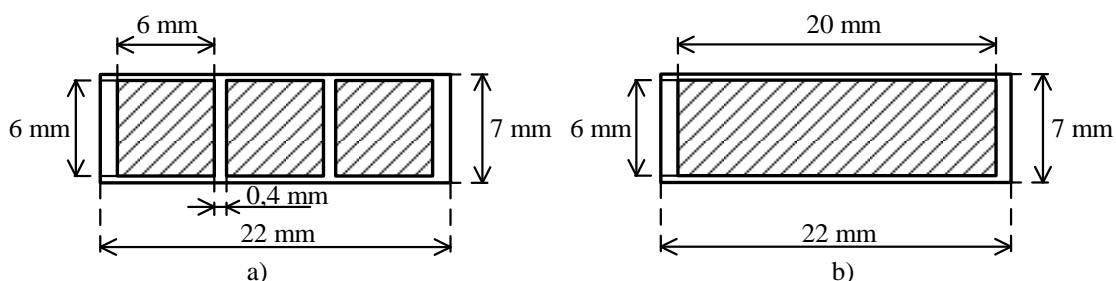
Z důvodu hlavně cenové dostupnosti a také uspokojivé účinnosti byly k přeměně optické energie na elektrickou vybrány malé monokrystalické solární FV od firmy IXYS. Monokrystalické články se vyznačují tím, že mají větší účinnost přeměny energie než amorfni a polykrystalické solární články. Byly vybrány dva typy těchto FV, první s výstupním napětím 1,5 V (KXOB22-04X3F [33]) a druhý s výstupním napětím 0,5 V (KXOB22-12X1F [34]). Jejich charakteristické elektrické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 9. Všechny hodnoty uvedené v tabulce byly dle katalogů FV měřeny za standardních podmínek při ozařování plošným výkonem $P_{\text{In}} = 100 \text{ mW/cm}^2$ a při teplotě 25 °C.

Tab. 9 Elektrické vlastnosti solárních článků KXOB22-04X3F [33] a KXOB22-12X1F [34].

Parametr	Symbol	Hodnota 04X3F	Hodnota 12X1F	Jednotka
Napětí naprázdno	U_{OC}	1,89	0,63	V
Proud nakrátko	I_{SC}	15	50	mA
Typické napětí v maximálním bodě výkonu	$U_{\text{FV,max}}$	1,5	0,5	V
Typický proud v maximálním bodě výkonu	$I_{\text{FV,max}}$	13,38	44,6	mA
Maximální špičkový výkon	$P_{\text{FV,max}}$	18,6	18,6	mW/cm ²
Fill faktor	FF	> 65	> 70	%
Účinnost solárního článku	η_{FV}	22	22	%

Pracovní teplota FV dle katalogu je - 40 až + 90 °C. Jejich fyzické rozměry jsou 22 x 7 x 1,8 mm. Velikosti fotocitlivých ploch jsou patrné z obr. 42. FV lze libovolně

elektricky spojit do série (ke zvýšení výstupního napětí) nebo paralelně (ke zvýšení výstupního proudu). Světlo vyzářené z optického vlákna by mělo mít (při správném zalomení konce vlákna a přesně kolmém umístění proti FV) přibližně kruhovou stopu. Vzhledem k rozměrům FV budou použity tři kusy od každého typu a budou fyzicky poskládané nad sebou tak, aby vytvořily FV pole o rozměrech 22 x 21 mm. Fotografie navržených FV polí společně s návrhy DPS a schémata zapojení jsou uvedeny v příloze. Elektrické zapojení bude u KXOB22-04X3F [33] paralelní a u KXOB22-12X1F [34] sériové, aby obě FV pole složené ze tří FV měly výstupní napětí 1,5 V. Proměřeny budou obě varianty FV polí, ale z údajů v tab. 9 a velikostí fotocitlivých ploch (s tím související hodnota FF) je již patrné, že by s výstupním výkonem na tom mělo být lépe FV pole se třemi FV KXOB22-12X1F [34]. Problém by mohl nastat s osvětlením FV polí, protože panely jsou téměř čtvercové a světlo vyzářené z vlákna má kruhový tvar, a tak nebude využito 100 % plochy FV polí. Navíc při umístění FV nad sebe na desce plošných spojů se zhorší hodnota FF celého FV pole, a tedy dojde ke zmenšení účinnosti přeměny energie.

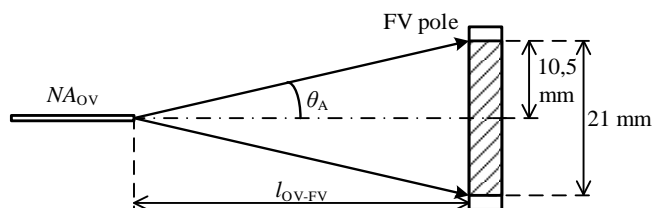


Obr. 42: Fotocitlivé plochy FV a) KXOB22-04X3F [33], b) KXOB22-12X1F [34].

Dále je třeba řešit problematiku navázání výkonu z vlákna na FV pole. Z apertur použitých vláken byl již vypočten pomocí rovnice (30) akceptační úhel $12,71^\circ$ (pro $105 \mu\text{m}$ vlákno) a $22,95^\circ$ (pro $1000 \mu\text{m}$ vlákno). Pod maximálně tímto úhlem by také mělo ozáření z vlákna vystupovat (viz obr. 43). Pokud bychom uvažovali Gaussovský profil svazku, byl by úhel ještě o něco větší. Pomocí goniometrické funkce tangens lze vypočítat v jaké vzdálenosti od vlákna s numerickou aperturou 0,22 by mělo být FV pole umístěno:

$$l_{\text{OV-FV}} = \frac{10,5}{\tan \theta_A} = \frac{10,5}{\tan 12,71} \approx 46,6 \text{ mm.} \quad (35)$$

Pro druhé $1000 \mu\text{m}$ vlákno vychází tato vzdálenost $l_{\text{OV-FV}} \approx 24,8 \text{ mm}$.

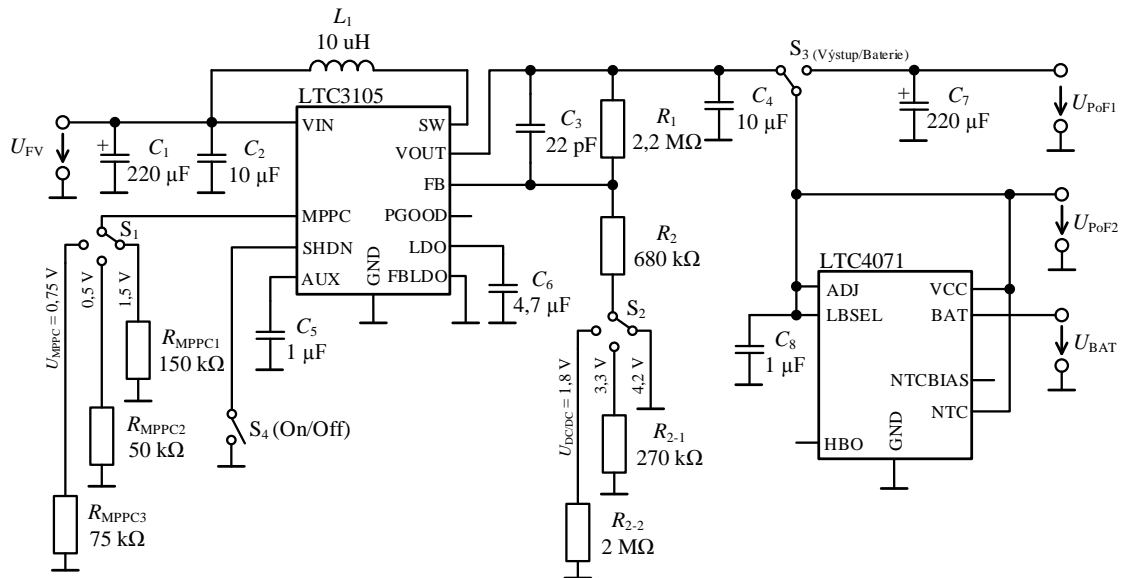


Obr. 43: Navázání optického výkonu z optického vlákna na FV pole.

Kvantová účinnost těchto FV je dle katalogových listů přibližně 94 % při dopadajícím světle o vlnové délce 808 nm a přibližně 60 % na vlnové délce 980 nm. Z údajů v katalogových listech lze odhadnout výstupní elektrický výkon těchto článků při osvětlení plošným výkonem 100 mW/cm^2 a při teplotě $25 \text{ }^\circ\text{C}$. V případě paralelního zapojení tří FV KXOB22-04X3F [33] by na výstupu, při dodržení maximálního bodu výkonu solárních článků, mělo být napětí 1,5 V a proud 40,14 mA. Výstupní výkon tohoto FV pole je 60,21 mW. U sériového zapojení tří FV KXOB22-12X1F [34] je také dobré dodržet maximální bod výkonu, a tedy se snažit držet výstupní napětí na FV poli 1,5 V (0,5 V na každém FV) a výstupní proud by měl dle katalogu být 44,6 mA. Do zátěže tedy bude dodán výkon 66,9 mW. V experimentálním systému PoF budou výstupní elektrické výkony FV polí menší, protože přibližná fotocitlivá plocha každého z FV pole je 4 cm^2 a vyzářený výkon z vlákna se bude pohybovat dle výpočtu (33) 198,6 mW. Při přepočtu na plošnou hustotu výkonu, dopadající na FV pole, dostáváme přibližně necelých 50 mW/cm^2 . Vychází tedy přibližně polovička doporučeného ozařovacího výkonu FV pole. Při použití 1,4 W LD půjde dosáhnout doporučeného ozařovacího plošného výkonu FV pole, ale bohužel FV pole nemá na vlnové délce 980 nm této LD tak vysokou kvantovou účinnost.

5.4 Zpracování elektrického výkonu

Pro dosažení maximální účinnosti celého PoF je vhodné použít účinný DC/DC konvertor se stabilizací výstupního proudu, proto k dalšímu zpracování elektrického výkonu dodávaného z FV pole byl zvolen již zmíněný step-up DC/DC konvertor LTC3105 [17]. Také hlavně kvůli jeho vestavěné funkci MPPC, která drží napětí na FV či FV poli na předem nastavené hodnotě v místě maximálního bodu výkonu výkonové charakteristiky FV. LTC3105 [17] je také zcela vyhovující z hlediska účinnosti, která je dle katalogu, při vstupním napětí kolem 1,5 V a výstupním proudem z konvertoru vyšším jak 1 mA, vyšší než 70 %. Je použito upravené výrobcem doporučené schématické zapojení (viz obr. 44) obsahující také integrovaný obvod LTC4071 [35], který slouží k řízení nabíjení připojeného akumulátoru. Obvod zvýší vstupní napětí dodávané z FV pole na předem nastavenou hodnotu přepínačem S_2 . Toto napětí je možné pomocí přepínače S_3 rovnou připojit na výstup 1 nebo lze využít připojeného 3,7 V Li-Po akumulátoru s kapacitou 50 mAh, který zajistí stabilní dodání výkonu do zátěže i při krátkodobé nefunkčnosti zdroje PoF. Při využití připojeného akumulátoru je nutné přepínač S_2 přepnout na hodnotu 4,2 V, protože obvod LTC4071 [35] a použitý akumulátor jsou uzpůsobeny k práci s napětím 4,2 V. K vypnutí a zapnutí činnosti step-up DC/DC konvertoru slouží spínač S_4 . Přepínač S_1 slouží k nastavení napětí maximálního bodu výkonu připojeného PV pole. V tomto systému bude přepnut na hodnotu 1,5 V, protože obě použité FV pole mají maximální bod výkonu při výstupním napětí 1,5 V. V experimentálním systému budou místo spínačů a přepínačů použity zkratovací propojky. Celkové zapojení přípravku s návrhem DPS jsou uvedeny v příloze práce.



Obr. 44: Solární nabíječka s LTC3105 a LTC4071. [36]

Dle doporučení výrobce součástky LTC3105 [17] je paralelně ke vstupnímu vývodu IN připojena dvojice filtračních kondenzátorů. Elektrolytický kondenzátor C_1 s velkou kapacitou v sobě akumuluje energii dodávanou z FV pole a pokud dojde ke jejímu krátkodobému snížení, tak slouží jako krátkodobý zdroj energie pro step-up DC/DC konvertor. Je nutné použít elektrolytický kondenzátor s nízkým ekvivalentním sériovým odporem (takzvaný Low-ESR kondenzátor). Výrobce dále doporučuje připojit paralelně další kondenzátor nejlépe keramický s menší kapacitou a umístit jej co nejbližší k pouzdru integrovaného obvodu. Ve schématu se jedná o kondenzátor C_2 . Mezi vstupem VIN a SW je nutné připojit induktor s nízkým stejnosměrným odporem, aby nebyla snížena účinnost step-up DC/DC konvertoru. Ideální hodnota indukčnosti při vstupním napětí 1,5 V z FV pole je 10 μH . Pokud by však bylo použito FV pole s menším výstupním napětím než 0,8 V, bylo by lepší použít induktor s větší indukčností [17]. Vstupní vývod SHDN slouží k vypnutí a zapnutí činnosti step-up DC/DC konvertoru. Pokud je tento vývod propojen s GND, tak je integrovaný obvod vypnut. K vývodu AUX výrobce doporučuje připojit keramický kondenzátor s kapacitou 1 μF . Tento kondenzátor napomáhá vnitřnímu startovacímu obvodu k nastartování funkčnosti step-up DC/DC konvertoru i při nízkém vstupním napětí. Vstupní vývod MPPC slouží k nastavení napětí maximálního bodu výkonu připojeného FV pole. Nastavení je provedeno pomocí rezistoru R_{MPPC} připojeného mezi tento vývod a GND. Velikost nastaveného napětí MPPC je určena pomocí rovnice: [17]

$$U_{\text{MPPC}} = 10 \cdot 10^{-6} \cdot R_{\text{MPPC}} \cdot [V] \quad (36)$$

Pomocí rovnice (36) byly vypočteny hodnoty rezistorů R_{MPPC} ve schématu, aby odpovídaly chtěným U_{MPPC} napětím.

Výstupní vývod PGOOD slouží k indikaci správné funkčnosti step-up DC/DC konvertoru. Pokud není použit, má být ponechán nezapojený. Vývod LDO je určen k přednostnímu napájení dalších externích mikrokontrolerů nebo senzorů. Výstupní proud tohoto vývodu je omezený na 6 mA. V zapojení však nebude využit, a tak k vývodu

LDO je připojen pouze keramický kondenzátor C_6 a vývod FBLDO, který slouží jako zpětná vazba k nastavení výstupního napětí na vývodu LDO, je dle doporučení připojen ke GND. Na výstupním vývodu VOUT se nachází zvýšené výstupní napětí. Dle doporučení je vhodné mezi tímto vývodem a GND připojit kondenzátor C_4 , který slouží k filtraci výstupního napětí. Opět je dobré tento kondenzátor na desce plošných spojů umístit co nejbližší k pouzdru LTC3105 [17]. S použitím vývodu FB lze pomocí odporového děliče složeného z rezistorů R_1 a R_2 (respektive R_{2-x}) měnit velikost výstupního napětí step-up DC/DC konvertoru dle rovnice: [17]

$$U_{DC/DC} = 1,004 \cdot \left(\frac{R_1}{R_2 + R_{2-x}} + 1 \right). \text{ [V]} \quad (37)$$

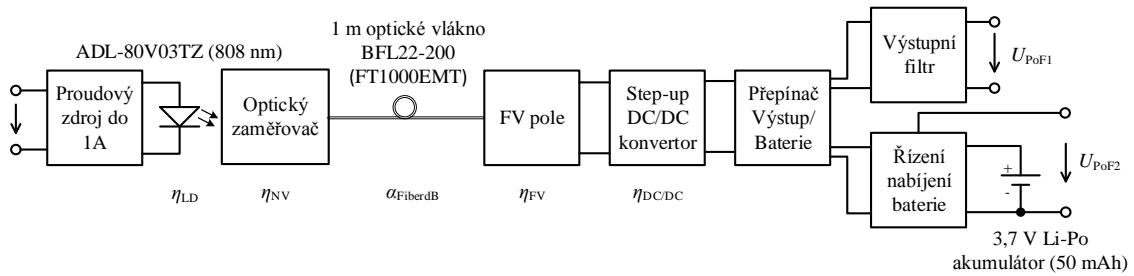
Velikosti výstupních napětí $U_{DC/DC}$ jsou uvedeny ve schématu zapojení u odpovídajících větví přepínače S_2 . Kondenzátor C_3 připojený mezi vývody VOUT a FB je určen ke snížení zvlnění výstupního napětí a zlepšení přechodové odezvy při zatížení.

Integrovaný obvod LTC4071 [35] hlídá napětí připojeného akumulátoru, aby nedošlo k jeho nadměrnému vybití nebo nabití a tím ke zničení akumulátoru. LTC4071 [35] je speciálně navržený pro práci s malými nabíjecími proudy od 550 nA, které jsou potřebné pro nabíjení nízkokapacitních 3,7 V Li-ion/Polymer akumulátorů. Integrovaný obvod má také funkci hlídání teploty akumulátoru při nabíjení. Pokud se akumulátor příliš zahřívá, tak sníží nabíjecí proud. Bohužel akumulátor použitý v systému PoF neobsahuje termistor, a tak tato funkce nebude využita. Vývod NTCBIAS zůstane tedy nepřipojený a vývod NTC je dle katalogu třeba připojit ke vstupnímu vývodu VCC. Vývodem ADJ lze nastavit velikost nabíjecího napětí akumulátoru. K nabíjení použitého 3,7 V Li-Po akumulátoru je třeba napětí 4,2 V, a tedy vývod ADJ je nutné připojit k vývodu VCC. Integrovaný obvod také umí odpojit zátěž při poklesu napětí akumulátoru pod předem nastavenou hodnotu. Tato hodnota je nastavitelná pomocí vývodu LBSEL a připojením k vývodu VCC je nastaveno minimální napětí akumulátoru na 2,7 V. Vývod HBO je možné využít k indikaci nabití akumulátoru. Jelikož indikační dioda by v systému PoF spotřebovávala příliš výkonu, nebude tato funkce využita. Vývod VCC je výkonový vstupní vývod, který se při nabíjení (respektive vybíjení) propojí s vývodem BAT. K výstupnímu vývodu BAT je připojený kladný pól akumulátoru. K vývodu VCC je dobré do blízkosti integrovaného obvodu umístit oddělovací keramický kondenzátor s kapacitou 1 μF určený k filtraci vysokých špiček zatěžovacího proudu [35].

5.5 Shrnutí návrhů

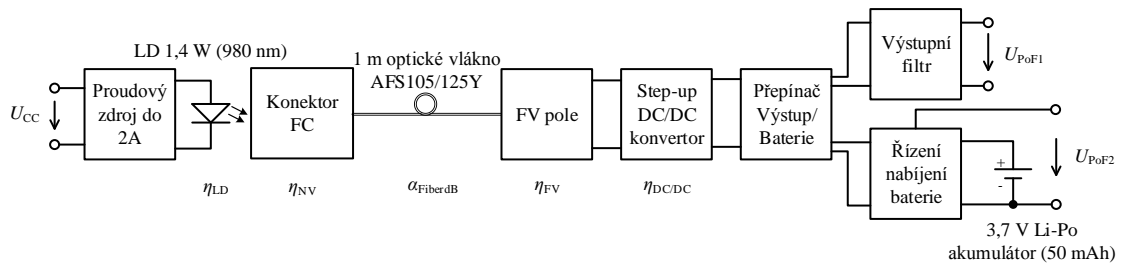
Jsou navrženy tři experimentální PoF systémy. První dva z nich využívají 500 mW LD ADL-80V03TZ [24] a jejich blokové schéma je uvedené na obr. 45. K buzení LD je využit 1 A proudový zdroj s LT3080 [26]. Dále je použit optický zaměřovač složený ze dvou AČ, který naváže optický výkon vyzářený z LD buď do 1 m dlouhého optického vlákna AFS105/125Y [27], použitého v první koncepci zdroje PoF, nebo do vlákna FT1000EMT [32], použitého v druhé koncepci. Světlo z optického vlákna bude dopadat na jedno z navržených FV polí, které bude mít větší účinnost přeměny energie (vyšší výstupní elektrický výkon). Step-up DC/DC konvertor převede napětí z FV na napětí, které bude připojené přepínačem na výstup 1 přes filtrační kondenzátor s vysokou

kapacitou nebo bude přivedené na výstup 2 přes obvod obsahující 3,7 V Li-Po akumulátor s kapacitou 50 mAh.



Obr. 45: Blokové schéma první a druhé koncepce experimentálního zdroje PoF.

Ve třetí koncepci experimentálního napájecího zdroje PoF (viz obr. 46) je použita 1,4 W LD, která obsahuje optovláknový konektor typu FC. Jako zdroj proudu pro LD je použit proudový zdroj se dvěma stabilizátory LT3080 [26], který má skokově nastavitelný výstupní proud od 0,4 do 1,88 A. Jako přenosový vlnovod optického výkonu je použito 1 m dlouhé optické vlákno AFS105/125Y [27] s nainstalovanými konektory typu FC. Přeměna optického výkonu na elektrický a jeho následné zpracování je stejné jak v prvním a druhém konceptu zdroje PoF.



Obr. 46: Blokové schéma třetí koncepce experimentálního zdroje PoF.

Na základě zjištěných informací o jednotlivých částech systému PoF byla stanovena výkonová bilance všech tří navržených koncepcí experimentálního zdroje PoF (viz tab. 10). Hodnoty účinností a útlumů uvedené v tabulce jsou zjištěné z katalogů jednotlivých součástek. Účinnosti optického zaměřovače s asférickými čočkami byly odhadnuty na základě poznatků z teoretické části práce (viz kapitola 2.4). Účinnost navázání optického výkonu 85 % ve třetí koncepci zdroje byla vypočtena z hodnoty útlumu 0,7 dB optovláknového konektorového spojení pomocí konektoru typu FC. Ve třetí koncepci zdroje PoF je výstupní optický výkon 1,4 W LD zmenšen na 0,5 W, protože při vyšších vyzářovacích optických výkonech by nejspíše docházelo k saturaci použitého FV pole na konci PoF systému. Hodnota pracovního proudu a příkonu 1,4 W LD byla odhadnuta na základě účinnosti udávané v katalogovém listu součástky. Účinnost FV pole ve třetí koncepci zdroje PoF byla odhadem zmenšena na 14 %, protože 1,4 W LD vyzářuje na vlnové délce 980 nm a není tak využito plné kvantové účinnosti křemíkového FV (viz kapitola 5.3). Účinnosti použitého step-up DC/DC konvertoru LTC3105 [17] byly odhadnuty na základě charakteristik uvedených v katalogu součástky. Reálné účinnosti všech komponent mohou tedy dosahovat jiných hodnot a budou určeny měřením v další části práce.

Z hodnot v tabulce byla vyčíslena celková účinnost navržených PoF systémů dle rovnice:

$$\eta_{\text{PoF}} = \frac{P_{\text{PoF}}}{P_{0\text{-LD}}} \cdot 100, [\%] \quad (38)$$

kde platí $P_{\text{PoF}} = P_{\text{DC/DC}}$. Celkové účinnosti navržených experimentálních PoF zdrojů nejsou nikterak velké. Největší výkonové ztráty jsou na použitých křemíkových FV polích, které mají velmi malé účinnosti. Spousta energie je také ztracena ve formě tepla na použitých LD. Ve výkonové bilanci i v celkové účinnosti systému PoF záměrně nefigurují účinnosti použitých budících obvodů pro LD, protože jsou navrženy z lineárních stabilizátorů, na kterých také dochází k velkým výkonovým ztrátám. V praktickém použití zdroje PoF by bylo vhodnější využití některého z komerčních spínaných zdrojů (například spínané zdroje pro výkonové LED), které dosahují mnohem větších účinností.

Tab. 10: Teoretická výkonová bilance navržených experimentálních systémů PoF.

Část systému	Veličina	Symbol	Hodnota		
			1.koncepce	2.koncepce	3.koncepce
Laserová dioda	Pracovní proud	I_{LD}	0,57 A	0,57 A	0,66 A
	Pracovní napětí	U_{LD}	1,9 V	1,9 V	1,9 V
	Příkon	$P_{0\text{-LD}}$	1,083 W	1,083 W	1,254 W
	Účinnost	η_{LD}	47 %	47 %	40 %
	Výstupní optický výkon	P_{LD}	500 mW	500 mW	500 mW
Optický zaměřovač, FC konektor	Účinnost navázání optického výkonu	η_{NV}	40 %	50 %	85 %
	Výkon navázaný do vlákna	P_{Fiber}	200 mW	250 mW	425,6 mW
Optické vlákno	Útlum	α_{FiberdB}	3 dB/km	10 dB/km	1,3 dB/km
	Délka	L	1 m	1 m	1 m
	Výstupní optický výkon	P_{In}	199,9 mW	249,4 mW	425,4mW
FV pole	Účinnost	η_{FV}	22 %	22 %	14 %
	Výstupní elektrický výkon	P_{FV}	44 mW	54,9 mW	59,6 mW
Step-up DC/DC konvertor	Účinnost	$\eta_{\text{DC/DC}}$	75 %	75 %	75 %
	Výstupní elektrický výkon	$P_{\text{DC/DC}}$	33 mW	41,2 mW	44,7 mW
PoF systém	Účinnost	η_{PoF}	3,05 %	3,8 %	3,56 %

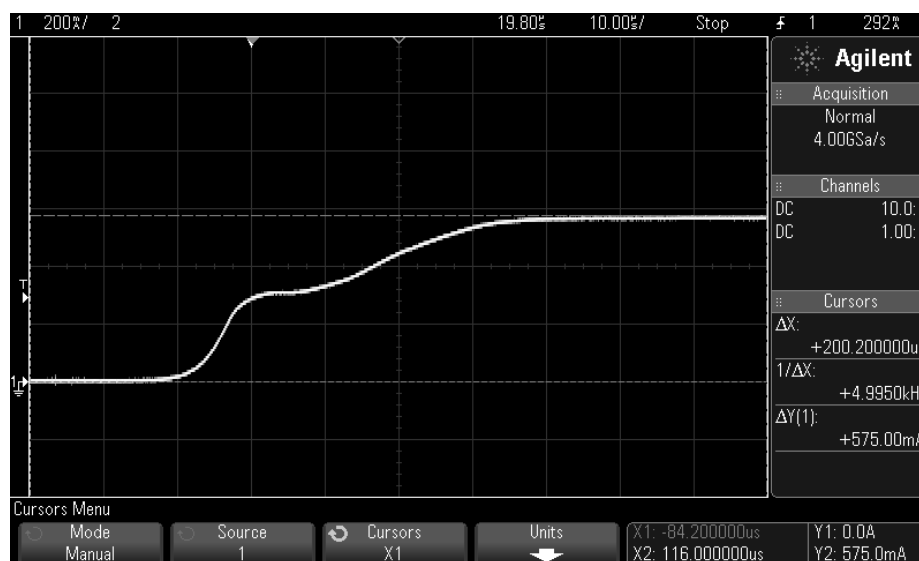
6 REALIZACE SYSTÉMU A MĚŘENÍ

V této kapitole bude komentován způsob realizace a měření navržených experimentálních systémů PoF. Budou zde také uvedeny výsledky měření. Změřené hodnoty budou porovnány s teoretickými hodnotami zjištěnými při návrhu. V poslední části budou diskutovány možné úpravy systému související se zvětšením jeho účinnosti.

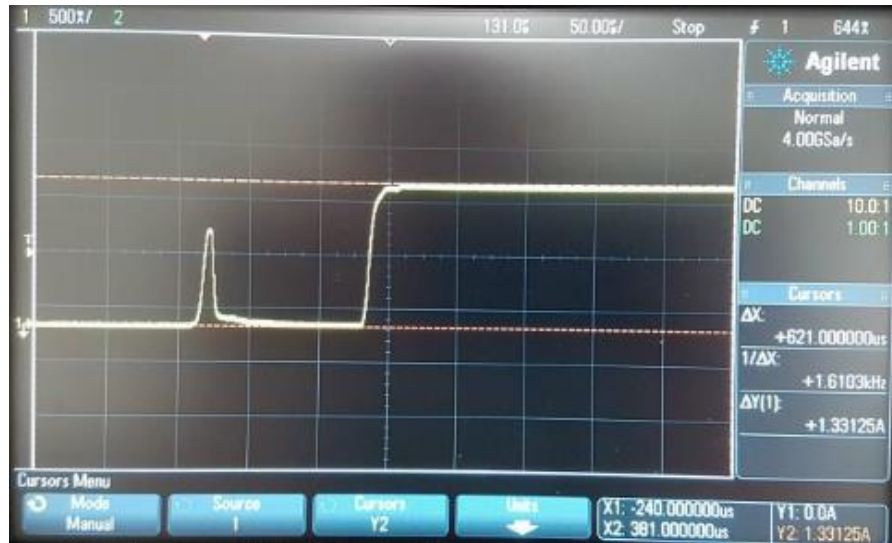
6.1 Ověření funkčnosti proudových zdrojů

Navržené proudové zdroje s lineárním stabilizátorem LT3080 [26] by při přivedení vstupního napětí mohly vykazovat nežádoucí přechodový jev, při kterém by vznikaly špičky výstupního proudu nad nastavenou úroveň. Tento jev by mohl ohrozit životnost nebo dokonce zničit připojené LD. K měření přechodového děje byl použit osciloskop Agilent DSO-X 3012A s aktivní proudovou sondou Agilent N2774A. Na výstupy proudových zdrojů byly připojeny místo LD dvě sériově spojené usměrňovací diody, aby na nich byl podobný úbytek napětí jako na LD ADL-80V03TZ [24] nebo 1,4 W LD. Jako zdroj napětí pro proudové zdroje byl použit stabilizovaný regulovatelný zdroj Diametral s nastaveným výstupním napětím $U_{CC} = 3,5$ V.

Byl proměřen celý rozsah nastavitelných výstupních proudů a žádný z nich nevykazoval nárůst proudu nad nastavenou úroveň. Pouze těsně před nastartováním obvodu se objevovaly proudové špičky, které nikdy nepřesáhly nastavenou výstupní úroveň proudu. Příklady změřených průběhů jsou vyobrazené na obr. 47 a 48. Výstupní proudy proudových zdrojů měly mírně menší hodnotu, než bylo vypočteno pomocí rovnic (26) a (27). To může být způsobeno tolerancí použitých rezistorů. Hlavně rezistor R_1 s hodnotou $0,1 \Omega$ má toleranci 5 %. Odchyłka od nominální hodnoty tohoto rezistoru velmi ovlivní velikost nastaveného výstupního proudu budícího obvodu.



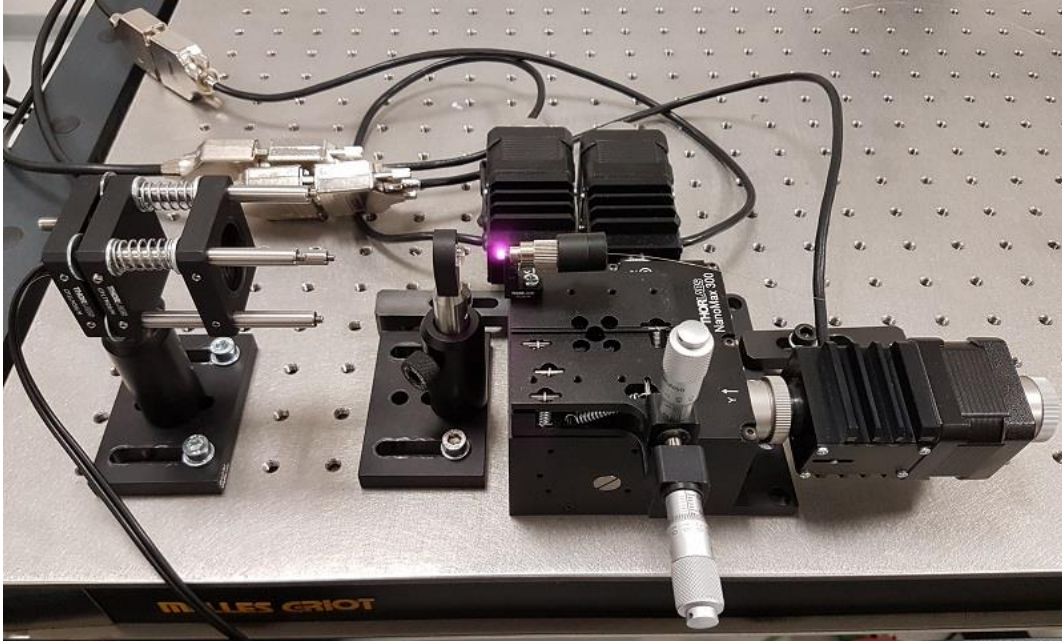
Obr. 47: Přechodový děj při startu 1 A proudového zdroje ($I_{LD} = 575$ mA, $U_{LD} = 1,67$ V).



Obr. 48: Přechodový děj při startu 2 A proudového zdroje ($I_{LD} = 1,33$ A, $U_{LD} = 1,7$ V).

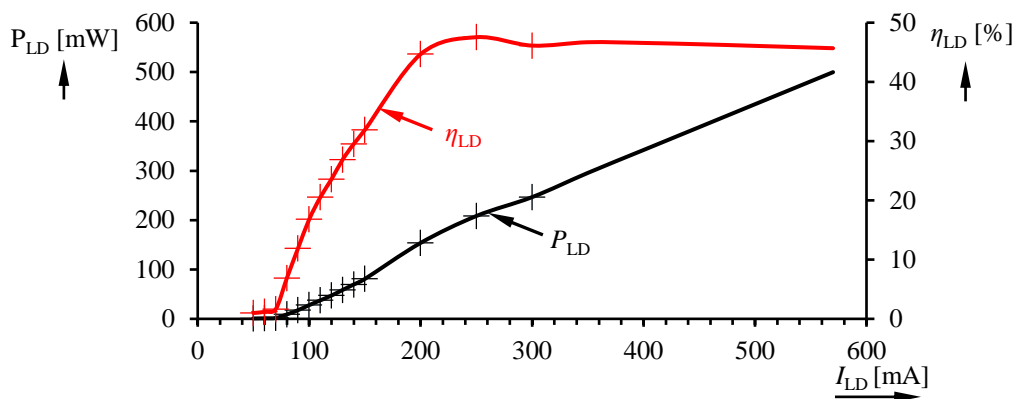
6.2 První koncepce zdroje PoF

Laserová dioda ADL-80V03TZ [24] byla osazena do optomechanického klecového (cage) systému firmy Thorlabs. Samotný hliníkový modul, do kterého je dioda osazena, slouží zároveň jako pasivní chladič diody. Cage systém obsahuje čtyři vodící tyče kruhového průřezu, na které je možné nasadit další modul s připevněnou kolimační čočkou C330TMD-B [29]. Kolimační čočka má ohniskovou vzdálenost 3,1 mm, a tak byl tento modul přibližně umístěn do této vzdálenosti od LD. Laserová dioda byla prozatím připojena k laboratornímu zdroji Agilent E3631A, který umožňuje přesné nastavení výstupního budícího proudu LD. Laboratorní zdroj byl použit z důvodu přesnějšího a rychlejšího nastavení budícího proudu LD, aby bylo možné efektivněji změřit požadované charakteristiky. Byla nastavena hodnota proudu I_{LD} těsně nad prahovým proudem LD a byla, pomocí stínítka, provedena vizuální kontrola průměru kolimovaného svazku v různých vzdálenostech od kolimační čočky. Cage systém umožňuje jemný posun, pomocí šroubu s velmi jemným závitem, vzdálenosti mezi LD a kolimační čočkou. Pomocí tohoto šroubu byla nastavena ohnisková vzdálenost tak, aby byl průměr kolimovaného svazku v různých vzdálenostech od čočky stejný. Dále bylo nutné připevnit fokusační čočku, která kolimovaný svazek fokusuje k ozáření apertury jádra vlákna. Bohužel použitá fokusační čočka od společnosti Edmund Optics [30] není kompatibilní s použitým cage systémem, a tak bylo nutné tuto čočku umístit do volného držáku s nastavitelnou výškou. Střed fokusační čočky bylo nutné umístit přesně do osy kolimovaného svazku. Za fokusační čočku byl k optickému stolu připevněn tří-osý lineární manipulátor řady Nanomax společnosti Thorlabs s osazenou dvou-osou platformou pro nastavení náklonu podél dvou rotačních os. Toto uspořádání zajišťovalo pozicování apertury jádra vlákna v pěti souřadných osách. Fotografie celého optického zaměřovacího systému je uvedena na obr. 49.



Obr. 49: Optický zaměřovač s asférickými čočkami a manipulátorem.

Nejdříve byla změřena výkonová charakteristika LD ADL-80V03TZ [24] a závislost její účinnosti na nastaveném budícím proudu (viz obr. 50). Měření vyzářeného optického výkonu LD bylo provedeno pomocí měřiče optického výkonu Exfo FOT-10A, který měří pomocí germaniové fotodiody. Měřič byl připevněn na manipulátor tak, aby jeho fotodioda byla v ohnisku fokusační čočky. Manipulátorem byla nalezena poloha maximálního výkonu a v této poloze bylo provedeno měření. Jelikož je tento přístroj kalibrován na jiných vlnových délkách, než je vlnová délka 808 nm použité LD, bylo nutné měřit optický výkon na vlnových délkách blízkých k vyzařovací vlnové délce LD (konkrétně na vlnových délkách 780 a 850 nm). Změřené hodnoty optického výkonu byly poté přepočteny na odpovídající vlnovou délku 808 nm. Při výpočtu byla využita skutečnost, že germanium má téměř lineární závislost citlivosti v rozsahu vlnových délek 600 až 1700 nm (viz obr. 24). Takovýmto způsobem byly přepočteny veškeré dále změřené optické výkony pomocí měřícího přístroje Exfo FOT-10A. Laboratorním zdrojem Agilent E3631A byl nastavován budící proud I_{LD} a odečítány hodnoty napětí U_{LD} na diodě a optické výkony změřené pomocí měřiče optického výkonu. Ze změřených hodnot byly vypočteny hodnoty příkonu LD a spočtena účinnost η_{LD} přeměny elektrického výkonu na optický výkon. Dle katalogu LD ADL-80V03TZ [24] by měla být závislost vyzařovaného optického výkonu LD na velikosti budícího proudu nad hodnotou prahového proudu lineární při stabilní teplotě pouzdra. Protože použitý měřič optického výkonu nedokáže změřit vyšší optické výkony než přibližně 300 mW, byla charakteristika na vyšších výkonech aproximována přímkou a vliv zahřívání pouzdra LD byl zanedbán. Pokud by tento vliv zanedbán nebyl, klesal by se zvyšujícím budícím proudem vyzářený optický výkon LD a klesala by její účinnost. V charakteristikách jsou změřené hodnoty vyznačené křížky a zbytek charakteristiky byl aproximován, respektive vypočten na základě použité aproximace v případě účinnosti. Ze změřených charakteristik je patrné, že účinnost LD stoupá k hodnotě přibližně 46 % a poté se ustálí. Změřená účinnost LD téměř odpovídá vypočtené hodnotě účinnosti 47 % z katalogových údajů o LD.

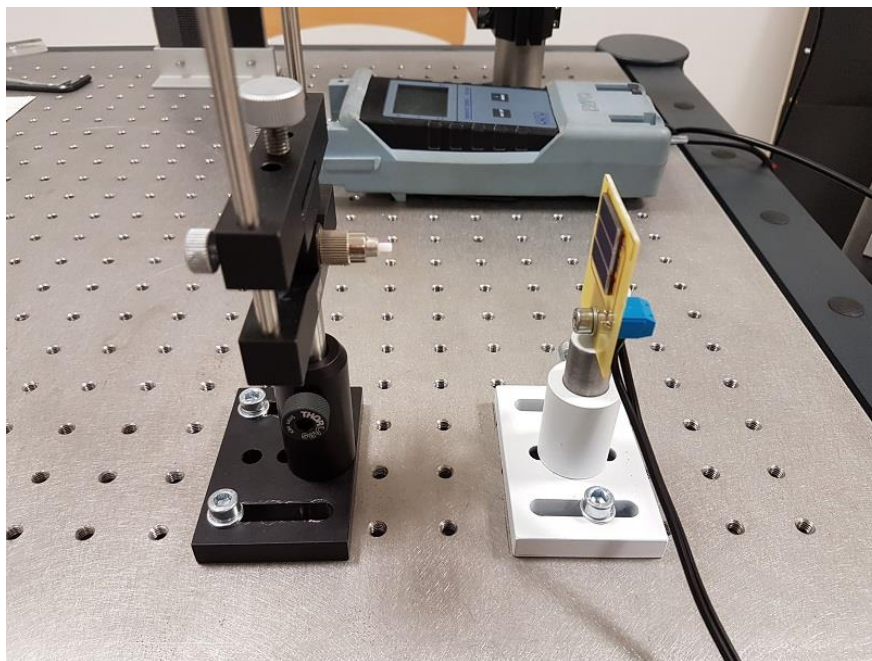


Obr. 50: Závislost vyzářeného optického výkonu a účinnosti přeměny energie na budícím proudu LD ADL-80V03TZ [24].

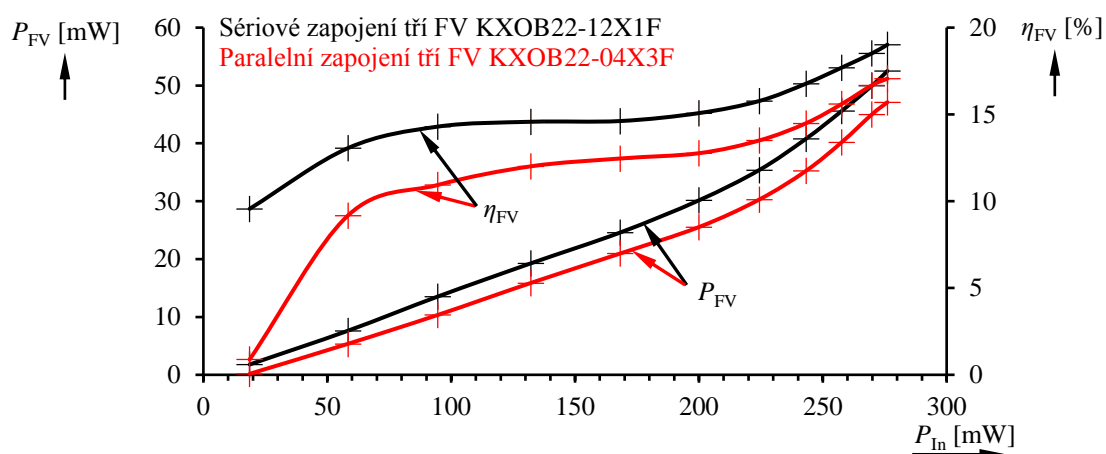
V první koncepci zdroje PoF je použito mnohovidové vlákno AFS105/125Y [27] s průměrem jádra 105 μm . Toto vlákno bylo nejdříve nutné zbavit primární ochrany pomocí stripovacích kleští a na jeho koncích zalomit. Vizuální kontrola zalomení vlákna byla provedena pomocí mikroskopu. Kvůli snadnějšímu uchycení k manipulátoru a připojení k měřiči optického výkonu byl na oba konce vlákna osazen konektor typu FC. Před montáží vlákna do připraveného přípravku byla pomocí vláknového mikroskopu Thorlabs CL-200 zkontrolována čistota apertury jádra vlákna. Vlákno bylo na jednom konci upevněno za feruli konektoru k manipulátoru (patrné z obr. 49). Na druhý konec vlákna byl připojen měřič optického výkonu Exfo FOT-10A. Na měřiči optického výkonu byla pozorována velikost navázaného výkonu do vlákna a pomocí manipulátoru byla nalezena a nastavena pozice apertury jádra vlákna vzhledem k fokusační čočce tak, aby byla účinnost navázání optického výkonu co nejvyšší. Dále byla změřena závislost účinnosti navázání optického výkonu do vlákna na velikosti vyzářeného výkonu LD, která je uvedena v příloze. Nejdůležitější je však hodnota účinnosti navázání optického výkonu při nejvyšším vyzářovacím výkonu LD, která dosahuje hodnoty $\eta_{NV} = 55,25\%$. Změřená účinnost navázání výkonu je mnohem vyšší než předpoklad 40 %. Do vlákna bylo tedy v tomto případě navázáno 276,09 mW optického výkonu při maximálním vyzářeném výkonu LD 499,7 mW. Útlum samotného vlákna byl ve výpočtech vzhledem k jeho délce 1 m zanedbán, protože by úbytek optického výkonu ve vlákne měl být menší než 1 mW, jak je patrné z výpočtu (33).

Dále byl k optickému stolu připevněn držák optického vlákna a připravený přípravek vlastní výroby s FV polem. Do držáku bylo za konektor přichyceno optické vlákno a FV pole bylo přibližně umístěno do vzdálenosti 47 mm, vypočtené ve výpočtu (35), od apertury vlákna. Způsob uchycení je vyobrazen na obr. 51. Byly změřeny charakteristiky dodávaného elektrického výkonu na dopadajícím optickém výkonu každého navrženého FV pole. Na základě změřených hodnot byly vypočteny a vyneseny závislosti účinnosti přeměny energie navržených FV polí na velikosti dopadajícího optického výkonu (viz obr. 52) a bylo zjištěno, že FV pole složené ze tří sériově zapojených FV KXOB22-12X1F [34] je účinnější a vhodnější pro použití v PoF systému. Tento fakt byl očekáván, protože toto FV pole má vyšší hodnotu fill faktoru (FF). V dalším měření bylo tedy využito uvedené FV pole. Maximální účinnost 19,02 % tohoto FV pole dosáhla téměř předpokládané hodnoty 22 %. Snížená účinnost FV polí mohla být způsobena nevyužitím 100 % fotocitlivé plochy, protože světlo vyzářené z vlákna má kruhovou

stopu a FV pole jsou téměř čtvercové. Fotografie kruhové stopy vyzařované z optického vlákna na FV pole je uvedena v příloze. Také na FV pole nedopadal dostatečně vysoký plošný optický výkon. Výkonové charakteristiky FV polí byly změřeny při výstupním napětí $U_{FV} = 1,5$ V, při kterém je dodržen maximální bod výkonu FV polí. Toto napětí bylo nastavováno pomocí dvojice sériově spojených vysokootáčkových zatěžovacích potenciometrů s hodnotami odporu $5\text{ k}\Omega$ pro hrubé a $100\ \Omega$ pro jemné nastavení úbytku napětí zmíněných $1,5$ V a byl odečítán zatěžovací proud dodávaný FV polem I_{FV} . Na základě těchto hodnot napětí a proudu byl vypočítán elektrický výkon dodávaný FV polem do odporové zátěže.



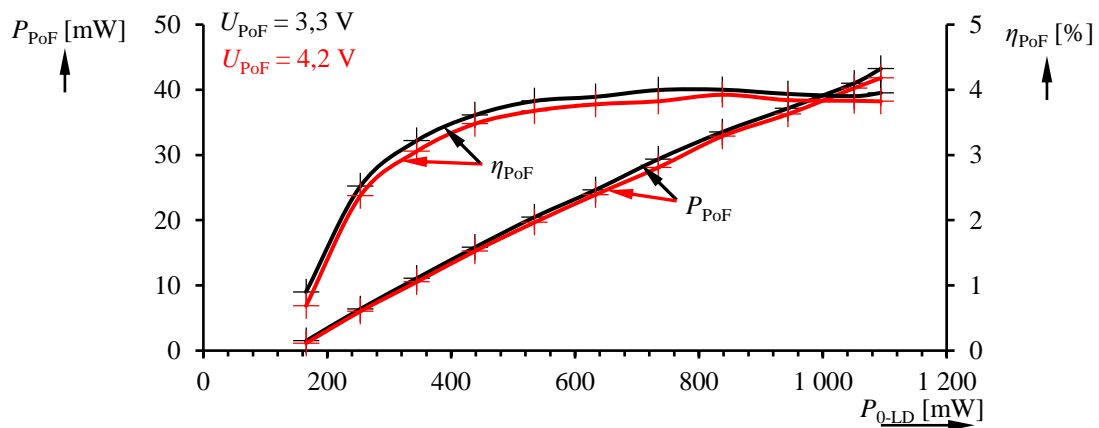
Obr. 51: Uchycení $105\ \mu\text{m}$ optického vlákna vzhledem k FV poli.



Obr. 52: Závislosti elektrického výkonu a účinnosti FV pole na dopadajícím optickém výkonu o vlnové délce 808 nm na FV pole v první koncepci zdroje PoF.

Následně byla k FV poli připojena solární nabíječka s DC/DC konvertorem

LTC3105 [17], který zvýší napětí 1,5 V dodávané FV polem na nastavené napětí 3,3 nebo 4,2 V, které je vhodné k napájení připojených elektronických obvodů. Byly změřeny závislosti účinností DC/DC konvertoru na velikosti výstupního proudu při nastaveném výstupním napětí 3,3 a 4,2 V. Tyto závislosti jsou uvedeny v příloze práce. Účinnost DC/DC konvertoru LTC3105 [17] se pohybovala kolem 85 % téměř v celém rozsahu výstupních proudů. Předpoklad účinnosti konvertoru byl 75 %. Měření výstupních proudů experimentálního systému PoF bylo provedeno opět na odporové zátěži složené ze dvou sériově zapojených potenciometrů o hodnotách odporu 5 k Ω a 100 Ω . Charakteristiky uvedené na obr. 53 zobrazují změřené závislosti výstupního výkonu na příkonu LD experimentálního systému PoF pro nastavené výstupní napětí 3,3 a 4,2 V. V charakteristice jsou také uvedeny závislosti účinnosti celého PoF systému vypočtené pomocí rovnice (38). Účinnost experimentálního PoF systému při nejvyšších výstupních výkonech 43,23 mW (při výstupním napětí 3,3 V) a 41,81 mW (při výstupním napětí 4,2 V) byla 3,95 % (při výstupním napětí 3,3 V) a 3,82 % (při výstupním napětí 4,2 V). Předpokládaná účinnost tohoto systému byla 3,05 %, a tak změřené hodnoty splnily očekávání. Jelikož DC/DC konvertor má mírně větší účinnost při 3,3 V výstupním napětí, má celý systém PoF při tomto výstupním napětí vyšší výstupní výkon a účinnost. Ze změřených hodnot uvedených v příloze je patrné, že DC/DC konvertor LTC3105 [17] pracoval správně a svojí vestavěnou funkcí držel napětí 1,5 V na FV poli v bodě jeho maximálního výkonu v celém rozsahu výstupních proudů.



Obr. 53: Závislosti výstupního výkonu a účinnosti na příkonu LD první koncepce experimentálního systému PoF.

Nakonec byl od LD odpojen laboratorní zdroj Agilent E3631A a byl připojen navržený proudový zdroj s lineárním stabilizátorem LT3080 [26] s nastaveným výstupním proudem na $I_{LD} = 0,57$ A, což je pracovní hodnota proudu použité LD ADL-80V03TZ [24]. Fotografie celého systému je uvedena v příloze. Byly opět změřeny maximální elektrické výkony dodávané experimentálním systémem PoF a vypočteny jeho účinnosti. Změřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 11. Byla ověřena stabilita celého systému a ukázalo se, že systém dodává do odporové zátěže stabilní proud při jakémkoliv nastaveném výstupním napětí. Změřené velikosti výstupních napětí systému PoF však nedosahují přesně nastavených hodnot. To může být způsobeno tím, že při výpočtu hodnot rezistorů, použitých k nastavení výstupního napětí (viz kapitola 5.4), bylo nutné použít rezistory s dostupnou nominální hodnotou. Navíc použité rezistory mají jistou

toleranci, která by mohla ovlivnit velikost výstupního napětí DC/DC konvertoru. Také byla prověřena funkčnost obvodu LTC4071 [35] s připojeným 50 mAh akumulátorem. Byl zjištěn maximální výstupní proud 8,99 mA při výstupním napětí 3,81 V zdroje PoF, při kterém nedochází k vybití připojeného akumulátoru. Výstupní napětí PoF systému s připojeným akumulátorem se pohybuje v rozmezí 3,7 až 4,2 V v závislosti na tom, jak je v danou chvíli akumulátor nabitý. Vzhledem k tomu že integrovaný obvod LTC4071 [35] spotřebovává část výstupního proudu PoF systému, byla snížena celková účinnost systému. Využití akumulátoru má však výhodu v tom, že při krátkodobém výpadku proudu, nebo pokud by z nějakého důvodu byla poškozena některá část systému, nedojde ke ztrátě informací. Například napájený mikrokontroler by při výpadku nebo snížení dodávaného výkonu zdrojem PoF po určitou dobu dále zpracovával změřené údaje pomocí čidel a ukládal by je do paměti. Podmínkou však je, že připojený obvod nemůže stále odebírat maximální proud dodávaný zdrojem PoF, aby integrovaný obvod LTC4071 [35] měl možnost průběžně dobíjet připojený akumulátor.

Tab. 11: Změřené hodnoty první koncepce zdroje PoF.

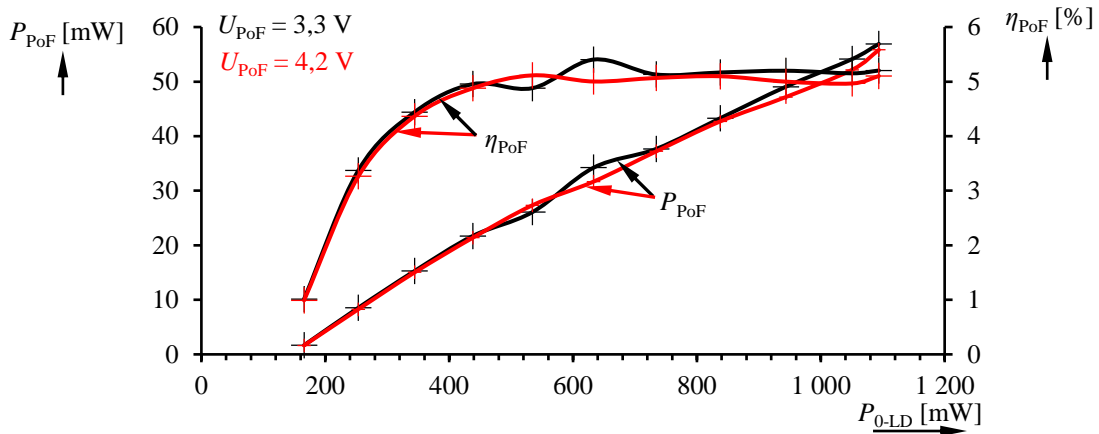
Nastavené výstupní napětí	I_{LD} [mA]	U_{LD} [V]	P_{0-LD} [mW]	U_{PoF} [V]	I_{PoF} [mA]	P_{PoF} [mW]	η_{PoF} [%]
3,3 V	569	1,937	1102,15	3,29	13,13	43,20	3,92
4,2 V	569	1,937	1102,15	4,21	9,9	41,68	3,78
Připojený 3,7 V akumulátor	569	1,937	1102,15	3,81	8,99	34,25	3,11

6.3 Druhá koncepce zdroje PoF

Druhá koncepce experimentálního zdroje PoF je stejná jako předchozí, pouze byl pro přenos optického výkonu použit patch kabel s označením M35L01 [31] obsahující mnohovidové 1000 μm vlákno FT1000EMT [32]. Způsob a postup měření byl tedy stejný jako v předešlém případě. Fotografie uchycení patch kabelu k manipulátoru a držáku před FV polem jsou uvedeny v příloze. Vzdálenost apertury vlákna od FV pole byla posunuta na 24,8 mm vypočtených dle (35). Do vlákna s mnohem větším průřezem jádra se podařilo z LD ADL-80V03TZ [24] navázat optický výkon 292,45 mW (při vyzářovacím výkonu LD 388,42 mW), což odpovídá účinnosti navázání výkonu do vlákna $\eta_{NV} = 75,29\%$. Bohužel nebylo možné přesně změřit účinnost navázání při maximálním vyzářovacím výkonu 499,71 mW LD, protože použitý měřič optického výkonu Exfo FOT-10A byl při vyšších vstupních výkonech satureován. I kdyby účinnost navázání maximálního výkonu vyzářeného LD byla o 10 % menší, je stále tato účinnost mnohem vyšší než do 105 μm vlákna, což je také patrné z následujících výsledků měření. Charakteristika účinnosti navázání optického výkonu do vlákna je uvedena v příloze. Ve výpočtu účinnosti navázání byl opět zanedbán vliv útlumu optického vlákna, který na délce 1 m použitého patch kabelu je v aplikaci PoF nepodstatný. Pokud by však bylo vlákno delší, byl by vliv útlumu vlákna nemalý a nešlo by jej zanedbat. Vliv útlumu vlákna na délce optické cesty byl rozebrán v kapitole 4.4.

Při měření bylo opět využito účinnější FV pole složené ze tří sériově zapojených FV KXOB22-12X1F [34]. Účinnost DC/DC konvertoru se stejně jak v předešlém případě pohybovala kolem 85 % (viz charakteristika v příloze). Ze změřených závislostí uvedených na obr. 54 je patrné, že výstupní elektrické výkony druhé koncepce experimentálního zdroje PoF dosahují hodnot 56,92 mW (při výstupním napětí 3,3 V)

a 55,82 mW (při výstupním napětí 4,2 V). Výstupní výkony zdroje PoF jsou díky použití vlákna s větším průřezem jádra (1000 μm) téměř o 14 mW vyšší, než při použití 105 μm vlákna, a tedy i účinnost PoF systému stoupla na 5,16 % (při výstupním napětí 3,3 V) a 5,06 % (při výstupním napětí 4,2 V). Očekávaná účinnost tohoto systému byla 3,8 %. Zvýšení účinnosti PoF systému oproti očekávání bylo zapříčiněno tím, že reálná účinnost navázání optického výkonu η_{NV} a účinnost DC/DC konvertoru $\eta_{\text{DC/DC}}$ byla mnohem vyšší, než se předpokládalo.



Obr. 54: Závislosti výstupního výkonu a účinnosti na příkonu LD druhé koncepce experimentálního systému PoF.

Opět byl k buzení LD místo laboratorního zdroje Agilent E3631A použit proudový zdroj s lineárním stabilizátorem LT3080 [26] s nastaveným výstupním proudem na $I_{\text{LD}} = 0,57 \text{ A}$ a byl změřen výstupní proud a napětí celého navrženého PoF zdroje. Bylo ověřeno, že zdroj dodává do odporové zátěže stabilní výkon. Změřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 12. Maximální výstupní proud PoF systému, při kterém nedochází k vybíjení připojeného akumulátoru, se oproti první koncepci zdroje zvýšil na 14,9 mA při výstupním napětí 3,8 V.

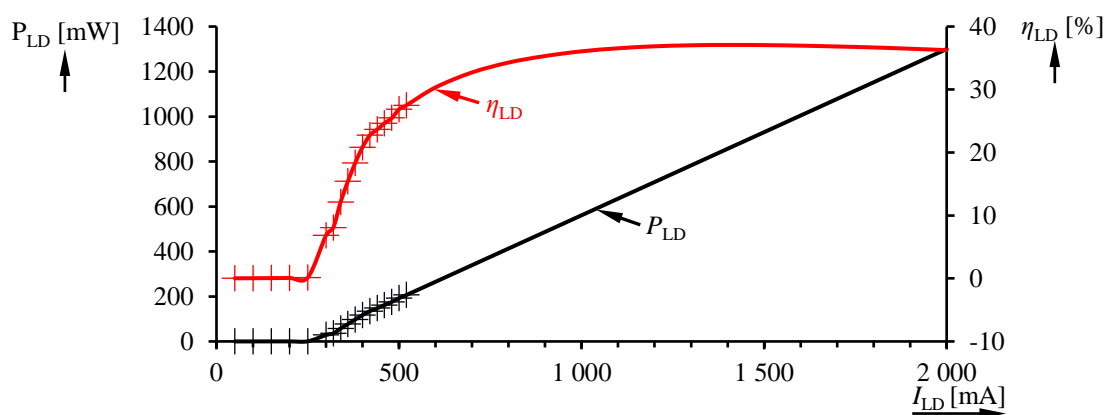
Tab. 12: Změřené hodnoty druhé koncepce zdroje PoF.

Nastavené výstupní napětí	I_{LD} [mA]	U_{LD} [V]	$P_{0\text{-LD}}$ [mW]	U_{PoF} [V]	I_{PoF} [mA]	P_{PoF} [mW]	η_{PoF} [%]
3,3 V	569	1,937	1102,15	3,29	17,29	56,88	5,16
4,2 V	569	1,937	1102,15	4,2	13,28	55,78	5,06
Připojený 3,7 V akumulátor	569	1,937	1102,15	3,8	14,9	56,62	5,14

6.4 Třetí koncepce zdroje PoF

Ve třetí koncepci zdroje PoF byla využita 1,4 W LD obsahující vlákno s průměrem jádra 50 μm a s osazeným konektorem typu FC. Při kontrole apertury 50 μm vlákna LD pomocí vláknového mikroskopu Thorlabs CL-200 bylo zjištěno, že se na konci konektoru vyskytují značné nečistoty nebo deformace povrchu, které i při opakovaném čištění do jisté míry přetrvávají a jsou zřejmě způsobeny i nízkou kvalitou konektoru. Pomocí měřiče optického výkonu Exfo FOT-10A byla změřena výkonová charakteristika této LD

(viz obr. 55). Změřená charakteristika byla pro budící proudy I_{LD} vyšší než 520 mA aproximována přímkou stejným způsobem, jako charakteristika LD změřená v první koncepci zdroje PoF. Opět byl zanedbán vliv zahřívání pouzdra LD. Z charakteristiky je patrný vliv nečisté apertury vlákna LD, protože maximální optický výkon LD zjištěný aproximací charakteristiky dosahuje hodnoty pouze 1,3 W místo katalogových 1,4 W. Ze změřených a aproximovaných hodnot byla vypočtena a vynesena závislost účinnosti LD. Účinnost LD se pohybuje kolem 36 %. Dle katalogu LD by se měla hodnota účinnosti pohybovat od 40 do 50 %. Je možné, že vznikla chyba aproximace vlivem zahřátí pouzdra LD i při malých budících proudech do 520 mA a tím byla ovlivněna vynesená účinnost LD.

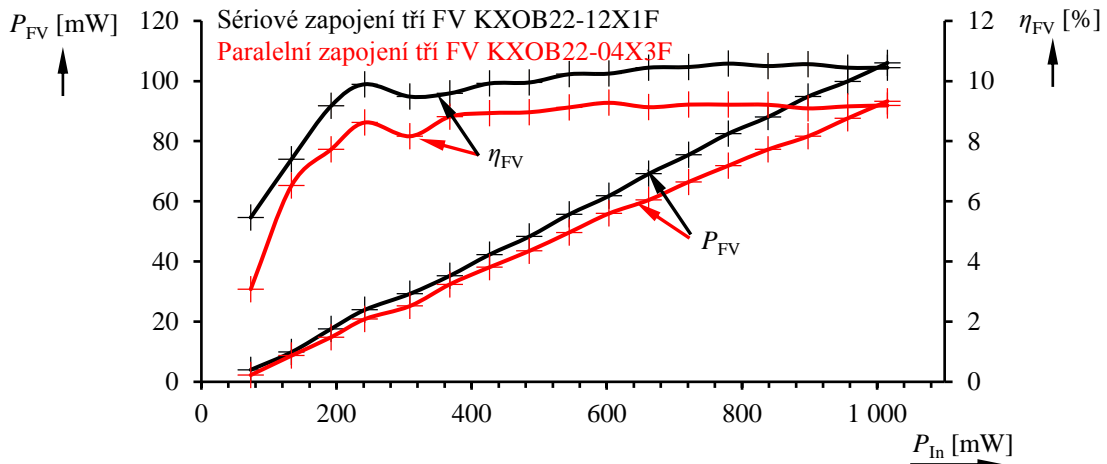


Obr. 55: Závislost vyzářeného optického výkonu a účinnosti přeměny energie na budícím proudu 1,4 W LD.

Dále bylo k LD připojeno pomocí optovláknové konektorové spojky typu FC již připravené 105 μm vlákno z prvního konceptu zdroje PoF a byla změřena účinnost navázání výkonu (viz charakteristika v příloze). Účinnost navázání optického výkonu při vyzářovacím výkonu LD 339 mW byla pouze 71,3 %. V kapitole 5.5 bylo vypočteno, že by při útlumu konektorového spojení 0,7 dB měla být účinnost navázání 85 %. Tato účinnost byla nejspíše snížena kvůli nízké kvalitě osazeného konektoru a neodstranitelným nečistotám na apertuře vlákna. Změřený útlum konektorového spojení je tedy 1,47dB.

Jelikož 1,4 W LD vyzářuje na jiné vlnové délce 980 nm než předešlá LD ADL-80V03TZ [24] byly znovu změřeny výkonové charakteristiky navržených FV polí (viz obr. 56), aby bylo zjištěno, které z nich je na této vlnové délce účinnější. Vzdálenost FV polí od apertury vlákna byla stejná jako v první koncepci zdroje PoF. Měření výstupního elektrického výkonu bylo provedeno při nastavení výstupního napětí 1,5 V, při kterém má FV pole nejvyšší výstupní výkon. Opět na tom výkonově bylo lépe FV pole se sériově spojenými FV KXOB22-12X1F [34]. Vypočtená účinnost přeměny optické energie na elektrickou u tohoto FV pole však dosahovala nízkých hodnot pouze 10,45 %. To je způsobeno tím, že použité FV mají dle katalogu na vlnové délce 980 nm nízkou kvantovou účinnost. Při tomto měření docházelo k mírné fluktuaci elektrického výkonu dodávaného FV polem. Protože při měření optického výkonu pomocí měřiče Exfo FOT-10A k této fluktuaci nedocházelo, nejspíše bude kolísání výstupního výkonu způsobeno FV polem, které se při takto velkých dopadajících optických výkonech značně

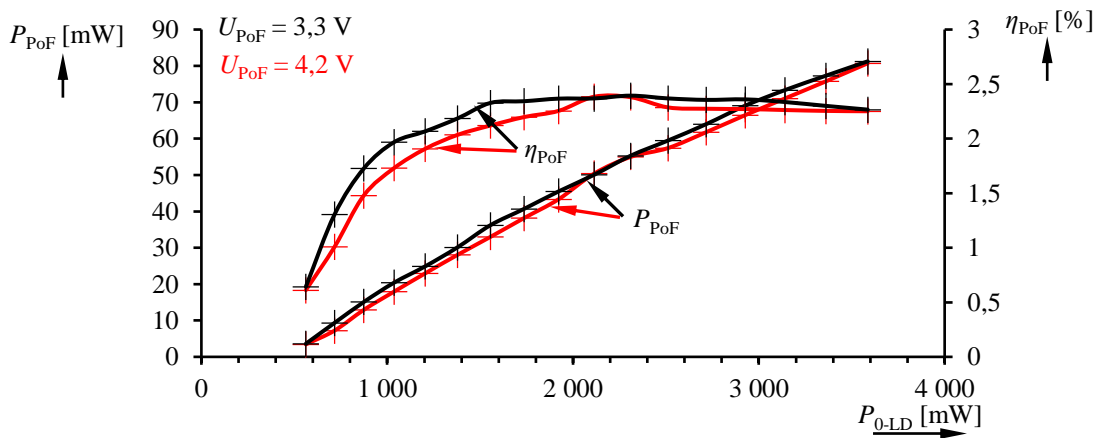
zahřívalo. Dle charakteristik na obr. 56 nedochází k saturaci FV polí, a tak při dalším měření je využit celý rozsah výstupních výkonů LD.



Obr. 56: Závislosti elektrického výkonu a účinnosti FV pole na dopadajícím optickém výkonu o vlnové délce 980 nm na FV pole ve třetí koncepci zdroje PoF.

I v tomto systému byla změřena závislost účinnosti na výstupním proudu DC/DC konvertoru, která je pro hodnoty výstupního napětí 3,3 a 4,2 V uvedena v příloze. Účinnost se opět pohybovala v okolí 85 %, avšak docházelo k jejímu kolísání nejspíše vlivem fluktuace proudu dodávaného z FV pole.

Třetí koncepcí experimentálního zdroje PoF dosahovala nejvyšších výstupních výkonů, ale zároveň měla nejmenší účinnost. Z charakteristik uvedených na obr. 57 je možné odečíst maximální výstupní výkon zdroje PoF 81,26 mW (při výstupním napětí 3,3 V) a 80,72 mW (při výstupním napětí 4,2 V). Účinnosti této koncepcí nebyly vyšší než 2,27 %. Malá účinnost zdroje PoF, oproti předpokladu 3,56 %, je způsobena hlavně kvůli nevhodné vlnové délce 1,4 W LD, která je důvodem malé účinnosti použitých křemíkových FV. Velikost účinnosti zdroje také ovlivnily nečistoty zjištěné na apertuře vlákna použité LD.



Obr. 57: Závislosti výstupního výkonu a účinnosti na příkonu LD druhé koncepcí experimentálního systému PoF.

Nakonec byl místo laboratorního zdroje Agilent E3631A použit 2 A proudový zdroj se dvěma lineárními stabilizátory LT3080 [26] s nastaveným výstupním proudem na $I_{LD} = 2$ A. Reálný výstupní proud proudového zdroje s lineárními stabilizátory byl o 48 mA nižší vlivem tolerance použitých rezistorů. Výstupní proud tekoucí do odporové zátěže byl u tohoto systému PoF značně nestabilní. Tato nestabilita mohla být způsobena vlivem nadměrného zahřívání FV pole. Druhým možným důvodem bylo použití nedostatečného pasivního chlazení LD. V tomto případě mohlo docházet vlivem ohřevu k opakovaným vratným modovým přeskokům LD spojeným se změnami výkonů a oteplením LD. U tohoto zdroje s připojeným akumulátorem je možné maximálně odebírat výstupní proud 21,6 mA, aby nedocházelo k jeho vybíjení.

Tab. 13: Změřené hodnoty třetí koncepce zdroje PoF.

Nastavené výstupní napětí	I_{LD} [mA]	U_{LD} [V]	P_{0-LD} [mW]	U_{PoF} [V]	I_{PoF} [mA]	P_{PoF} [mW]	η_{PoF} [%]
3,3 V	1952	1,861	3632,67	3,29	24,8	81,59	2,25
4,2 V	1952	1,861	3632,67	4,2	19,7	82,74	2,28
Připojený 3,7 V akumulátor	1952	1,861	3632,67	3,8	21,6	82,08	2,26

6.5 Shrnutí a porovnání výsledků měření

U všech experimentálních zdrojů PoF byly změřeny účinnosti dílčích součástí a celého PoF zdroje. Porovnání očekávaných a změřených účinností je uvedeno v tab. 14. Hodnoty v tabulce platí při maximálním vyzařovacím výkonu použitých LD. Účinnosti LD přibližně odpovídaly hodnotám uváděným v katalogových listech. Navázání optického výkonu do vlákna pomocí soustavy dvou asférických čoček se povedlo lépe, než se očekávalo, a tak účinnosti navázání byly mnohem vyšší. Bohužel 1,4 W LD ve třetí koncepci zdroje měla vadný optovláknový konektor, a proto byla účinnost navázání výkonu menší. U první koncepce zdroje PoF byly účinnosti FV polí menší, protože na ně nedopadal dostatečný plošný optický výkon. V druhé koncepci nebyly účinnosti FV polí měřeny, a tak nejsou uvedeny. Ve třetí koncepci jsou účinnosti FV polí menší, protože dle katalogu mají menší kvantové účinnosti na vlnové délce 980 nm, kterou vyzařuje 1,4 W LD. Účinnosti FV polí mohly také být ovlivněny tím, že nebylo využito 100 % fotocitlivé plochy těchto polí. Účinnosti DC/DC konvertoru jsou téměř ve všech případech vyšší o víc než 10 %, a tak jeho účinnosti předčily očekávání. Díky vyšším účinnostem dílčích komponent u první a druhé koncepce zdroje PoF byly i celkové účinnosti navržených experimentálních zdrojů vyšší. Třetí koncepce zdroje je názorným příkladem toho, že při návrhu zdroje PoF je nutné dodržet hodnoty pracovních vlnových délek všech dílčích komponent použitých ve zdroji PoF. Pokud jedna z komponent není tímto způsobem vybrána (použitá 1,4 W LD nebo křemíkový FV), dojde ke snížení účinnosti celého systému.

Tab. 14: Porovnání očekávaných a změřených účinností.

Podmínka	Veličina	První koncepce zdroje		Druhá koncepce zdroje		Třetí koncepce zdroje	
		Očekáváno	Změřeno	Očekáváno	Změřeno	Očekáváno	Změřeno
-	η_{LD} [%]	47	45,68	47	45,68	40 až 50	36,25
-	η_{NV} [%]	40	55,25	50	75,29	85	71,32
KXOB22-12X1F	η_{FV1} [%]	22	19,02	22	-	14	10,45
KXOB22-04X3F	η_{FV2} [%]	22	17,06	22	-	14	9,19
$U_{DC/DC} = 3,3$ V	$\eta_{DC/DC}$ [%]	75	86,53	75	86,02	75	87,38
$U_{DC/DC} = 4,2$ V	$\eta_{DC/DC}$ [%]	75	84,63	75	85,41	75	86,52
$U_{PoF} = 3,3$ V	η_{PoF} [%]	3,05	3,92	3,8	5,16	3,56	2,25
$U_{PoF} = 4,2$ V	η_{PoF} [%]	3,05	3,78	3,8	5,06	3,56	2,28
3,7 V akumulátor	η_{PoF} [%]	3,05	3,11	3,8	5,14	3,56	2,26

Z hlediska účinnosti zdroje PoF lze porovnat s experimentálními systémy pouze jedno komerční zařízení, a to zařízení Power over Fiber Platform (PoFP) [21] od společnosti MH GoPower. Jejich platforma obsahuje 1 W laserovou diodu a dle údajů od výrobce je schopná dodávat elektrický výkon až 250 mW. Přepočtem na účinnost dostáváme hodnotu účinnosti 25 %, avšak tato účinnost je vztažena k vyzařovacímu výkonu použité LD. Navržené experimentální zdroje PoF mají účinnosti vztažené k vyzařovacímu výkonu LD 8,65 % u první koncepce zdroje, 11,38 % u druhé koncepce zdroje a 6,25 % u třetí koncepce zdroje.

Dále byly porovnány očekávané a změřené výstupní výkony experimentálních systémů PoF (viz tab. 15). U třetí koncepce zdroje PoF byla vypočtena očekávaná hodnota při nízkém vyzařovacím výkonu LD, a tak tato hodnota není v tabulce uvedena. První a druhá koncepce experimentálního zdroje PoF není příliš vhodná pro praktické využití z důvodu nadměrné složitosti navázání optického výkonu do přenosového vlákna. Jako nejvýhodnější z hlediska výstupního výkonu se k použití napájení elektronických obvodů jeví třetí koncepce zdroje PoF. Také by byla výhodnější z hlediska jednoduchosti navázání optického výkonu do vlákna pomocí konektoru typu FC. Avšak tento experimentální zdroj PoF měl ze všech navržených zdrojů nejmenší účinnost a dodával do odporové zátěže značně nestabilní výkon.

Tab. 15: Očekávané a změřené výstupní výkony experimentálních zdrojů PoF.

Podmínka	Veličina	První koncepce zdroje		Druhá koncepce zdroje		Třetí koncepce zdroje	
		Očekáváno	Změřeno	Očekáváno	Změřeno	Očekáváno	Změřeno
3,3 V	P_{PoF} [mW]	33	43,2	41,2	56,88	-	81,59
4,2 V	P_{PoF} [mW]	33	41,68	41,2	55,78	-	82,74
3,7 V akumulátor	P_{PoF} [mW]	33	34,25	41,2	56,62	-	82,08

Komerční zdroje PoF, uvedené ve 3. kapitole, mají výstupní elektrické výkony 1,08 W u systému od RLH Industries [19], 0,5 až 1 W u systému JDSU PPM-5 [20] a 250 mW u zařízení Power over Fiber Platform (PoFP) [21] od společnosti MH GoPower.

Všechny navržené koncepce by byly schopny napájet nízkopříkonové senzory či mikrokontroléry, ale v praktické realizaci by nebyly příliš kompaktní a odolné. Navíc by bylo třeba, aby měly vyšší výstupní výkony. Jako řešení obou problémů by bylo využití laserové diody SPL 2F81-2S [37] od firmy Osram a fotovoltaiického výkonového převodníku ABR-POC204L [38] od společnosti Broadcom. Obě součástky mají stejnou pracovní vlnovou délku 808 nm a jsou sladěny i výkonově. Laserová dioda SPL 2F81-2S [37] má maximální vyzařovací optický výkon 1,5 W a fotovoltaiický výkonový převodník by s tímto optickým výkonem na vstupu by byl schopný dodávat do zátěže až 650 mW elektrického výkonu při napětí 3,6 V. Obě součástky obsahují konektor typu FC a mají numerickou aperturu rovnou 0,22. Pouze by bylo nutné je propojit vhodným mnohovidovým optickým vláknem s nízkým útlumem na vlnové délce 808 nm a instalovanými konektory typu FC. Bohužel jsou obě tyto součástky příliš cenově náročné, a tak by bylo třeba zvážit efektivitu jejich využití.

7 ZÁVĚR

V teoretické části práce byl vysvětlen princip zdroje PoF a byly uvedeny možné způsoby provedení tohoto zdroje. Také byly uvedeny příklady použití napájecího zdroje PoF a jeho hlavní výhody, či nevýhody oproti napájení pomocí měděných vodičů. Byla provedena analýza jednotlivých komponent s cílem zjistit, jaká technologie je nejvýhodnější pro použití v experimentálním systému PoF. Byly rozebrány důležité parametry klíčových částí systému, které ovlivňují přenášený výkon zdroje PoF. Jako první byla popsána konstrukce optických vláken a uvedeny nejpoužívanější typy vláken. Dále byly rozebrány technologie optických zdrojů a fotodetektorů, které by bylo možné použít v aplikaci PoF. Nedílnou součástí zdroje PoF je také DC/DC konvertor. Byly uvedeny dva komerční step-up DC/DC konvertory a vypsány jejich vlastnosti, které jsou klíčové při použití ve zdroji PoF. Také byla rozebrána problematika navázání optického výkonu ze zdroje záření do vlákna a z vlákna na fotodetektor.

Dále byly porovnány tři komerční řešení systému PoF. Byla stručně popsána jejich funkce a diskutovány jejich vlastnosti a zjištěné parametry. Všechna uvedená zařízení mají překvapivě vysoké výstupní výkony i účinnosti. Systémy jsou však finančně velmi nákladné.

Další část práce se věnuje popisu možného návrhu optické části systému PoF. Bylo popsáno, na které parametry je vhodné se zaměřit při výběru dílčích komponent použitých v systému PoF. Také bylo diskutováno, jak se jednotlivé parametry vzájemně ovlivňují a jaký mají vliv na celkovou účinnost systému. Byly navrženy příklady optických linek se SMF a MMF s cílem zjistit jaký typ vlákna je vhodné použít v experimentálním systému PoF. Bylo zjištěno, že na kratší vzdálenosti je výhodnější využít nějaký typ mnohovidového vlákna.

Na základě rozboru v teoretické části práce byly vybrány cenově dostupné komponenty a navrženy tři experimentální systémy. Byla vybrána dvojice laserových diod s výstupními optickými výkony 0,5 a 1,4 W. Pro tyto LD byly navrženy budící proudové zdroje s použitím lineárních stabilizátorů LT3080. Vzhledem k tomu, že předpokládaná délka vlákna pro experimentální systém byla pouze 1 m, byly pro přenos optické energie vybrány dvě MMF SI o průměru jádra 105 a 1000 μm . K přeměně optického výkonu na elektrický byly využity křemíkové fotovoltaické články a byly z nich navrženy a sestaveny malé fotovoltaické panely (FV pole). Ke zpracování výstupního napětí bylo využito step-up DC/DC konvertoru LTC3105, který společně s integrovaným obvodem LTC4071 tvoří solární nabíječku. Nabíječka byla upravena tak, aby k ní bylo možné připojit i jiné FV pole a bylo možné měnit velikost výstupního napětí.

První z navržených experimentálních systémů využívá 500 mW LD. Z této LD bylo nutné co nejefektivněji navázat optický výkon do vlákna. Byla navržena a sestavena optická soustava skládající se ze dvou asférických čoček. Předpoklad byl, že do 105 μm mnohovidového vlákna se tímto způsobem podaří navázat pouze 40 % optického výkonu vyzářeného laserem. Reálně se povedlo navázat přes 55 % optického výkonu a díky tomu se celková účinnost experimentálního zdroje PoF zvýšila na 3,92 % při výstupním napětí 3,3 V z původně předpokládaných 3,05 %. První z navržených systémů je tedy schopen dodávat do zátěže až 43,2 mW elektrického výkonu.

Druhý experimentální systém byl stejný, ale pro přenos optické energie bylo využito 1000 μm vlákno. Účelem bylo zjistit, o kolik se zlepší účinnost navázání optického výkonu do optického vlákna s výrazně větším průměrem jádra a jak to ovlivní celkovou účinnost PoF systému. Dle přibližného výpočtu by tento systém měl mít účinnost 3,8 %. Jelikož se pomocí optické soustavy povedlo do vlákna navázat až 75 % optického výkonu vyzářeného laserovou diodou, byla celková účinnost systému vyšší než 5 % při nastavení jakékoliv hodnoty výstupního napětí. Maximální výstupní elektrický výkon tohoto PoF zdroje je 56,9 mW.

Výkonnější 1,4 W laserová dioda byla společně s 105 μm optickým vláknem využita ve třetím experimentálním systému. Bohužel použitý fotovoltaický článek má na vlnové délce 980 nm této laserové diody menší kvantovou účinnost, a proto změřená účinnost tohoto systému se pohybovala kolem 2,2 % oproti předpokládané účinnosti 3,56 %. Na zmenšení účinnosti se také podílel poškozený optovláknový konektor použité laserové diody. I přes to tento PoF zdroj dodával do zátěže až 82,74 mW optického výkonu při nastaveném výstupním napětí na 4,2 V. Bohužel tento experimentální systém vykazoval jistou nestabilitu výstupního proudu tekoucího do připojené odporové zátěže.

LITERATURA

- [1] WANG, Jin, Qi LI, Jing YAN, Yanwen DING, Yunqing LU, Yunshan ZHANG a Hongdan WAN. Power-over-fiber technique based sensing system for internet of things. *International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)* [online]. 2016, 2016, (15) [cit. 2018-03-06]. DOI: 10.1109/ICOON.2016.7932370. ISBN 10.1109/ICOON.2016.7932370. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7932370/>
- [2] LOPEZ-CARDONA, J. D., Carmen VAZQUEZ, David Sanchez MONTERO a Pedro Contreras LALLANA. Remote Optical Powering Using Fiber Optics in Hazardous Environments. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY* [online]. 2018, **36**(3), 748–754 [cit. 2018-03-06]. DOI: 10.1109/JLT.2017.2776399. ISBN 10.1109/JLT.2017.2776399. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8118084/>
- [3] ROSOLEM, Joao Batista. Power-Over-Fiber Applications for Telecommunications and for Electric Utilities. ROKA, Rastislav. *Optical Fiber and Wireless Communications* [online]. InTech, 2017, s. 255-278 [cit. 2018-01-30]. ISBN 978-953-51-3276-9. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/optical-fiber-and-wireless-communications>
- [4] KAMIYAMA, Daisuke, Akira YONEYAMA a Motoharu MATSUURA. Multichannel Data Signals and Power Transmission by Power-Over-Fiber Using a Double-Clad Fiber. *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS* [online]. 2017, , 1-4 [cit. 2018-03-06]. DOI: 10.1109/LPT.2018.2810158. ISBN 10.1109/LPT.2018.2810158. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8303714/>
- [5] *Power over Fiber* [online]. North America: Lumentum Operations, 2015 [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: https://www.lumentum.com/sites/default/files/technical-library-items/poweroverfiber-tn-pv-ae_0.pdf
- [6] KEISER, Gerd. *Optical communications essentials*. New York: McGraw-Hill, c2003. ISBN 0071412042.
- [7] ROMEISER, Malcolm. *Optical fibers and RF: a natural combination*. Atlanta, GA: Noble Pub., c2004. ISBN 81-203-3015-3.
- [8] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika* [online]. [cit. 2018-01-30]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/Impresum.html>
- [9] Damage at the Air / Glass Interface. *Thorlabs, Inc.* [online]. USA, 2018 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6838
- [10] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody Část 1 - Princip funkce laserových diod. *Elektrorevue* [online]. 2001, 1. 10. 2001, **2001**(34) [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
- [11] LUKÁŠ, Michal. Laserové diody 2 - Typy a struktury laserových diod. *Elektrorevue* [online]. 2001, 21. 11. 2001, **2001**(43) [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html>
- [12] PETERKA, Pavel a kol. Vlákňové lasery. *Věda kolem nás* [online]. 2014, (1) [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: http://www.vedakolemnas.cz/miranda2/export/sitesavcr/data.avcr.cz/academia/vedakolemnas/sys/galerie-download/vkn_002_2014_web.pdf?0.19472701302022477
- [13] *Princip vláknového - FIBER LASERU* [online]. Leonardo technology, 2018 [cit. 2018-03-07]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>

- [14] JOHNSON, M. *Photodetection and Measurement: Maximizing Performance in Optical Systems*. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [15] LÁSKO, Jan. *Problematika přenosu optického paprsku optickým vláknem* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010 [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/5781>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Jan Šporik.
- [16] MOHAN, Ned, Tore M. UNDELAND a William P. ROBBINS. *Power electronics. 2*. New York: John Wiley, 1995. ISBN 0-471-58408-8.
- [17] Linear Technology Corporation. *LTC3105 400mA Step-Up DC/DC Converter with Maximum Power Point Control and 250mV Start-Up*, 2010, s. 18, Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3105fb.pdf>
- [18] Texas Instruments. *TPS6120x Low Input Voltage Synchronous Boost Converter With 1.3-A Switches*, 2014, s. 34, Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61200.pdf>
- [19] Power Over Fiber System (PoF). *Fiber Optic Links* [online]. U.S.A: RLH Industries, 2018 [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <https://www.fiberopticlinc.com/products-item/power-over-fiber-system-pof/>
- [20] JDSU Power Over Fiber Module. *Laser Technology* [online]. Cabrils - Barcelona: Kopelia [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <http://www.laser-technology.com/en/products/item/193-power-over-fibre>
- [21] PoFP Series Power over Fiber Platform. *MH GoPower* [online]. Kaohsiung - Taiwan: MH GoPower Company Limited [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: http://www.mhgopower.com/laser_pof_Platform.html
- [22] SCHUBERT, J., E. OLIVA, F. DIMROTH, W. GUTER, R. LOECKENHOFF a A. W. BETT. *High-Voltage GaAs Photovoltaic Laser Power Converters* [online]. [cit. 2018-04-20]. DOI: 10.1109/TED.2008.2010603. ISBN 10.1109/TED.2008.2010603. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4752734/>
- [23] ANDREEV, Viacheslav, Vladimir KHVOSTIKOV, Vitali KALINOVSKY, et al. High current density GaAs and GaSb photovoltaic cells for laser power beaming. *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion* [online]. 2003, **3**, 761-764 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1305394/>
- [24] Arima LASERS. *Infrared Laser Diode ADL-80V03TZ*, 2002, s. 2, Dostupné z: <http://www.a-laser.cn/pdf.php?link=pdf/LD/Arima%20LD/808nm/ADL-80V03TZ>
- [25] Laserová dioda L-SLD6510A. In: *GM electronic, spol. s.r.o.* [online]. 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/laserova-dioda-l-sld6510a>
- [26] Linear Technology Corporation. *LT3080 Adjustable 1.1A Single Resistor Low Dropout Regulator*, 2007, s. 28, Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3080fc.pdf>
- [27] Thorlabs, Inc. *Step-Index Multimode Fiber AFS105/125Y*, 2013, s. 1, Dostupné z: https://www.thorlabs.de/drawings/bc7227e6e10bcd2-AC1BC3D5-9508-3CFC-5939113C52F65B81/AFS105_125Y-SpecSheet.pdf
- [28] Choosing a Collimation Lens for Your Laser Diode. *Thorlabs, Inc.* [online]. USA, 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7

- [29] Thorlabs, Inc. *C330TMD-B - $f = 3.1$ mm, $NA = 0.7$, Mounted Geltech Aspheric Lens, AR: 600-1050 nm*, 2018, s. 1, Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/drawings/f190607ae0a833c-ABADD470-081A-997D-2E6ECE318A9E2F02/C330TMD-B-AutoCADPDF.pdf>
- [30] Edmund Optics. *0.25 NA 11.00mm FL MgF2 AR Coated, Molded Aspheric Lens*, 2018, s. 1, Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/document/download/434317>
- [31] Thorlabs, Inc. *M35L01 - $\varnothing 1000$ μm , 0.39 NA, SMA-SMA Fiber Patch Cable, Low OH, 1 Meter*, 2018, s. 1, Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/drawings/d96f32f4e4fcbdad-BD02E1A5-E549-35F3-A227FB2E1D997AAC/M35L01-AutoCADPDF.pdf>
- [32] Thorlabs, Inc. *0.39 NA TECSTM Hard Clad, Step-Index, Multimode Fiber*, 2016, s. 2, Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/drawings/fc1370225da84dea-AC847F50-D4F9-ACF6-86131FA67E4254F9/FT1000EMT-SpecSheet.pdf>
- [33] IXYS Corporation. *IXOLAR High Efficiency SolarBIT KXOB22-04X3F*, 2016, s. 6, Dostupné z: http://ixapps.ixys.com/DataSheet/KXOB22-04X3F_Nov16.pdf
- [34] IXYS Corporation. *IXOLAR High Efficiency SolarBIT KXOB22-12X1F*, 2016, s. 6, Dostupné z: http://ixapps.ixys.com/DataSheet/KXOB22-12X1F_Nov16.pdf
- [35] Linear Technology Corporation. *LTC4071 Li-Ion/Polymer Shunt Battery Charger System with Low Battery Disconnect*, 2010, s. 18, Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/4071fc.pdf>
- [36] HOFFART, Fran. *Maximum Power Point Control Simplifies Energy Harvesting. Linear Technology Solutions*, 2010. [cit. 2018-01-30] Dostupné z: <http://www.linear.com/solutions/1049>
- [37] OSRAM Opto Semiconductors GmbH. *SPL 2F81-2S Laser Diode in TO-220 Package with FC-Connector 1.5 W cw Version 1.1*, 2016, s. 8, Dostupné z: <https://media.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-2496498/SPL%202F81-2S.pdf>
- [38] Broadcom. *AFBR-POCxxxL Optical Power Converter*, 2018, s. 11, Dostupné z: <https://docs.broadcom.com/docs/AFBR-POCxxxL-DS103>
- [39] DVORKÝ, Pavel. *Měřicí modul napájený po optickém vlákně*. Diplomová práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, 2011.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

P_{FD}	Elektrický výkon na výstupu fotodiody.
P_{FV}	Elektrický výkon na výstupu fotovoltaického článku.
P_{In}	Optický výkon na vstupu fotodiody.
P_{LD}	Optický výkon vyzařovaný laserovou diodou.
P_S	Optický výkon vyzařovaný světelným zdrojem.
$P_{MaxFiber}$	Maximální možný optický výkon, který může být vyzářen do vlákna bez jeho zničení.
P_{Fiber}	Optický výkon navázaný do vlákna.
P_{0-LD}	Příkon laserové diody.
P_{Z-LD}	Tepelné ztráty laserové diody.
$P_{DC/DC}$	Elektrický výkon na výstupu step-up DC/DC konvertoru.
P_{max_LD}	Maximální optický výkon vyzářený laserovou diodou.
P_{max_LED}	Maximální optický výkon vyzářený fotoluminiscenční diodou.
P_{FD_max}	Maximální výstupní elektrický výkon fotodiody.
P_{FV_max}	Maximální výstupní elektrický výkon fotovoltaického článku.
α_{Fiber}	Totální ztráty optického vlákna.
α_{Conn}	Totální ztráty optických konektorů.
$\alpha_{FiberdB}$	Útlum vlákna v jednotkách dB/km.
α_{ConndB}	Totální útlum konektorů v dB.
η_{FD}	Účinnost fotodiody.
η_{FV}	Účinnost fotovoltaického článku.
$\eta_{DC/DC}$	Účinnost DC/DC konvertoru.
η_{NV}	Účinnost navázání optického výkonu do vlákna.
η_D	Diferenciální účinnost laserové diody.
η_{PoF}	Celková účinnost Power-Over-Fiber systému.
η	Kvantová účinnost fotodiody.
C	Kapacita.
R	Odpor.
L	Indukčnost.
d	Průměr jádra optického vlákna.

r	Poloměr jádra optického vlákna.
r_S	Poloměr emisní plochy světelného zdroje.
l	Délka přenosového vlákna.
l_{OV-FV}	Vzdálenost fotovoltaického článku od optického vlákna.
n_1, n_2	Indexy lomu.
n_0	Index lomu prostředí vně vlákna.
θ_1	Úhel dopadu.
θ_2	Úhel lomu.
θ_m	Mezní úhel dopadu, pro splnění totálního odrazu.
θ_A	Maximální úhel navázání paprsku do vlákna.
θ_P	Paralelní divergentní úhel laserové diody.
θ_K	Kolmý divergentní úhel laserové diody.
c	Rychlost světla ve vakuu.
h	Planckova konstanta.
q	Náboj elektronu.
v	Rychlost světla v jiném látkovém prostředí.
λ	Pracovní vlnová délka.
λ_c	Maximální vlnová délka dopadající na fotodiodu, cutoff wavelength.
f	Frekvence.
NA	Numerická apertura.
NA_{LD}	Numerická apertura laserové diody.
NA_{OV}	Numerická apertura optického vlákna.
α_A	Útlum absorpcí.
α_R	Rayleighův rozptyl.
α_N	Rozptyl na makroskopických neregularitách.
α_{MO}	Rozptyl na mikroohybech.
α_O	Rozptyl na makroohybech a jiných deformacích.
ΔE	Šířka zakázaného pásu.
E_c	Energetická hladina vodivostního pásu.
E_v	Energetická hladina valenčního pásu.
E_1 a E_2	Energetické hladiny.
U	Elektrické napětí.
U_{CC}	Napájecí napětí.

U_{in}	Vstupní napětí.
U_{out}	Výstupní napětí.
U_{BR}	Průrazné napětí fotodiody.
U_{OC}	Napětí naprázdno fotodiody.
U_{LD}	Napětí na laserové diodě.
U_{FV_max}	Typické napětí v maximálním bodě výkonu fotovoltaického článku.
$U_{DC/DC}$	Výstupní napětí step-up DC/DC konverotru.
U_{BAT}	Napětí akumulátoru.
U_{PoF}	Výstupní napětí zdroje Power-Over-Fiber.
I	Elektrický proud.
I_P	Prahový proud laseru.
I_{ph}	Fotoproud generovaný fotodiodou.
I_{SC}	Proud nakrátko fotodiody.
I_{LD}	Proud procházející laserovou diodou.
I_{SET}	Konstantní proud tekoucí z vývodu SET.
I_{FV_max}	Typický proud v maximálním bodě výkonu fotovoltaického článku.
$I_{DC/DC}$	Výstupní proud step-up DC/DC konvertoru.
I_{PoF}	Výstupní proud zdroje Power-Over-Fiber.
R_O	Optická odrazivost na rozhraní dvou prostředí.
t	Čas.
t_{on}, t_{off}	Čas sepnutí a vypnutí.
D	Střída.
T	Perioda.
T_P	Provozní teplota pouzdra laserové diody.
R_Z	Zátěžový odpor.
i_L	Časový průběh proudu cívkou.
u_L	Časový průběh napětí na cívce.
$R(\lambda)$	Citlivost fotodiody.
FF	Plnicí faktor fotovoltaického článku, fill factor.
r_K	Poloměr konvergentního svazku.
$f_{AČ}$	Ohnisková vzdálenost čočky.

PoF	Přenos energie po optickém kabelu, Power over fiber.	
LD	Laserová dioda.	
FD	Fotodioda.	
OV	Optické vlákno.	
WDM	Wavelength-division multiplexing.	
DCF	Double-Clad Fiber.	
DC/DC	Převodník stejnosměrného napětí na jiné stejnosměrné napětí.	
DC	Stejnoseměrné napětí (proud).	
SMF	Jednovidové vlákno, Single Mode Fiber.	
MMF	Mnohovidové vlákno, Multi Mode Fiber.	
SI	Skoková změna indexu lomu, Step-index.	
GI	Gradientní změna indexu lomu, Graded-index.	
NA	Numerická apertura, Numerical Aperture.	
MFD	Mode Field Diameter.	
LED	Elektroluminiscenční dioda.	
LD	Laserová dioda.	
FP	Fabry-Perotův.	
DFB	Distributed-feedback.	
VCSEL	Vertical cavity surface-emitting.	
FBG	Fiber Bragg Grating.	
FV	Fotovoltaický článek.	
FC, ST, SC, SMA	Typy optovláknových konektorů.	
S	Spínač.	
D	Dioda.	
MPPC	Maximum power point control.	
SW, SHDN, AUX, ADJ, LBSEL, VCC		Vstupní vývody.
NTC, NTCBIAS, V _{CONTROL} , IN		Vstupní vývody.
PGOOD, LDO, FBLDO, VOUT, FB, HBO, BAT, OUT		Výstupní vývody.
GND	Zemnicí vývod.	
SET	Řídicí vývod.	
AČ	Asférická čočka.	
DPS	Deska plošných spojů.	

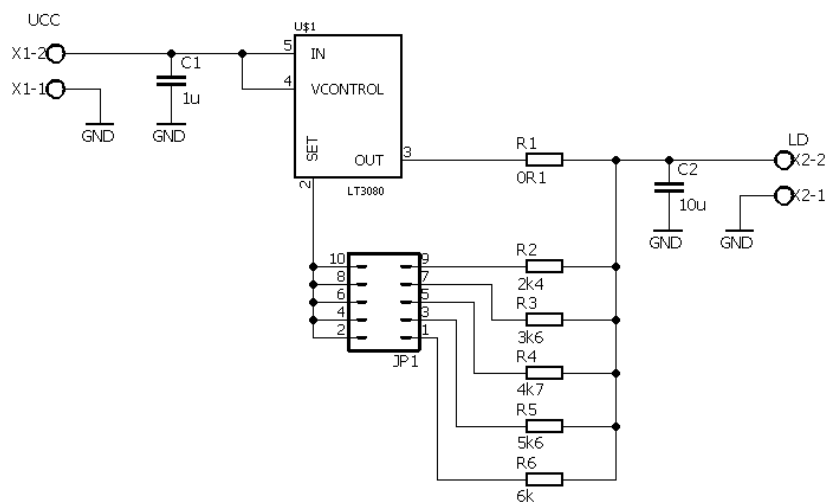
SEZNAM PŘÍLOH

A	Návrh zařízení	75
A.1	Proudový zdroj s jedním LT3080 a výstupním proudem 0 až 1 A	75
A.2	Proudový zdroj se dvěma LT3080 a výstupním proudem 0 až 2 A	76
A.3	FV pole – paralelní zapojení	78
A.4	FV pole – sériové zapojení.....	79
A.5	Solární nabíječka s LTC3105 a LTC4071	80
B	Seznam součástek	82
B.1	Proudový zdroj s jedním LT3080 a výstupním proudem 0 až 1 A	82
B.2	Proudový zdroj se dvěma LT3080 a výstupním proudem 0 až 2 A	82
B.3	FV pole – paralelní zapojení	83
B.4	FV pole – sériové zapojení.....	83
B.5	Solární nabíječka s LTC3105 a LTC4071	83
C	Změřené charakteristiky	84
C.1	Účinnosti navázání optického výkonu do vlákna.....	84
C.2	Účinnosti DC/DC konvertoru v první koncepci zdroje PoF	84
C.3	Účinnosti DC/DC konvertoru ve druhé koncepci zdroje PoF.....	85
C.4	Účinnosti DC/DC konvertoru ve třetí koncepci zdroje PoF	85
D	Měřicí pracoviště	86
D.1	Ověření funkčnosti proudových zdrojů.....	86
D.2	Navázání optického výkonu do 105 μm vlákna.....	86
D.3	Ozáření FV pole	87
D.4	Celý systém první koncepce zdroje PoF	87
D.5	Navázání optického výkonu do 1000 μm vlákna.....	88
D.6	Uchycení 1000 μm optického vlákna vzhledem k FV poli.....	88
D.7	Navázání optického výkonu z 1,4 W LD do 105 μm vlákna	89
D.8	Celý systém třetí koncepce zdroje PoF	89
D.9	Měření výkonových charakteristik.....	90
E	Tabulky Změřených a vypočtených hodnot	91
E.1	První koncepce zdroje PoF	91
E.2	Druhá koncepce zdroje PoF	93
E.3	Třetí koncepce zdroje PoF	95

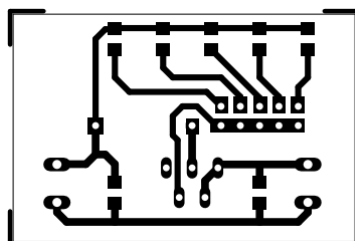
A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Proudový zdroj s jedním LT3080 a výstupním proudem 0 až 1 A

A.1.1 Obvodové zapojení



A.1.2 Deska plošných spojů – bottom (strana spojů)

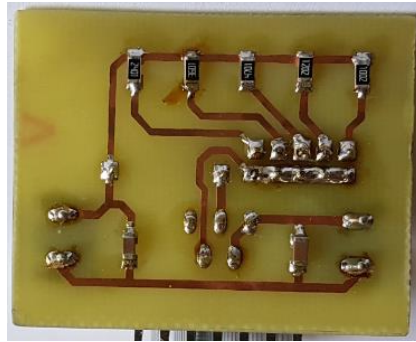


Rozměr desky 45 x 30 [mm], měřítko M1:1

A.1.3 Osazený přípravek – top

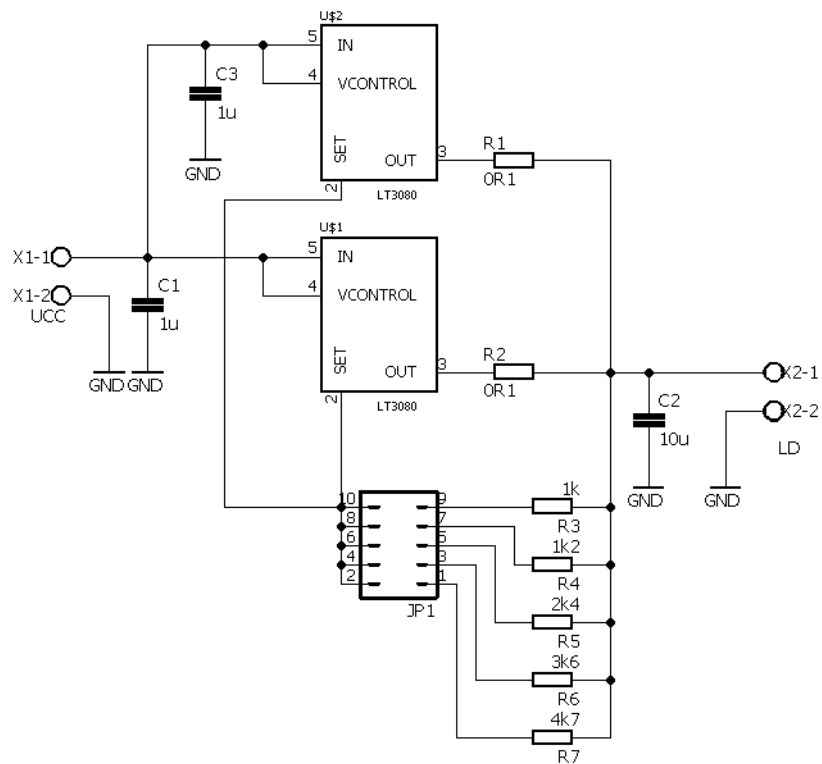


A.1.4 Osazený přípravek – bottom

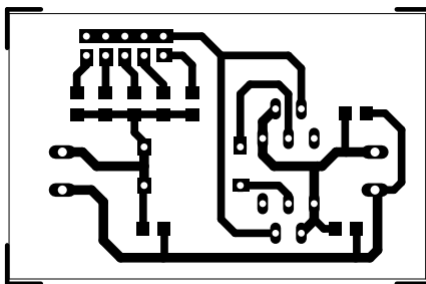


A.2 Proudový zdroj se dvěma LT3080 a výstupním proudem 0 až 2 A

A.2.1 Obvodové zapojení

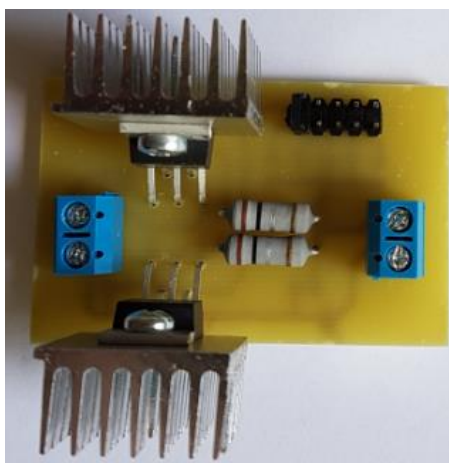


A.2.2 Deska plošných spojů – bottom (strana spojů)

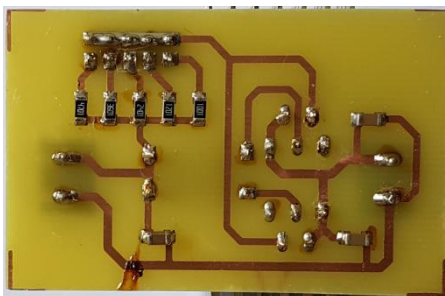


Rozměr desky 55 x 35 [mm], měřítko M1:1

A.2.3 Osazený přípravek – top

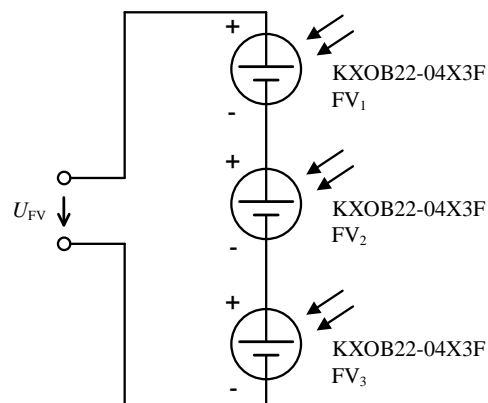


A.2.4 Osazený přípravek – bottom

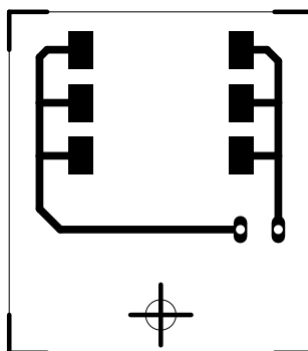


A.3 FV pole – paralelní zapojení

A.3.1 Obvodové zapojení

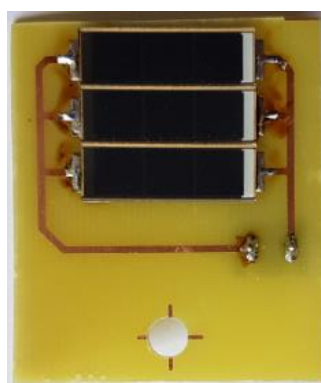


A.3.2 Deska plošných spojů – top (strana spojů)



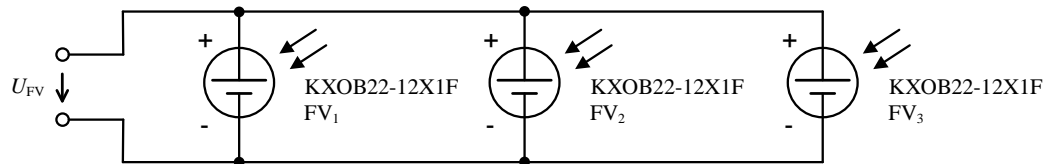
Rozměr desky 40 x 45 [mm], měřítko M1:1

A.3.3 Osazený přípravek – top

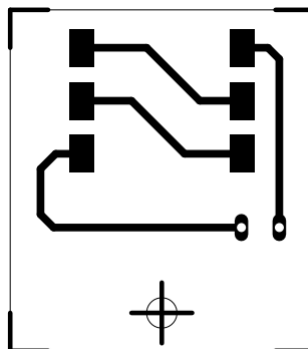


A.4 FV pole – sériové zapojení

A.4.1 Obvodové zapojení

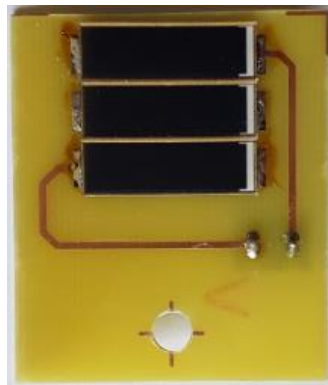


A.4.2 Deska plošných spojů – top (strana spojů)



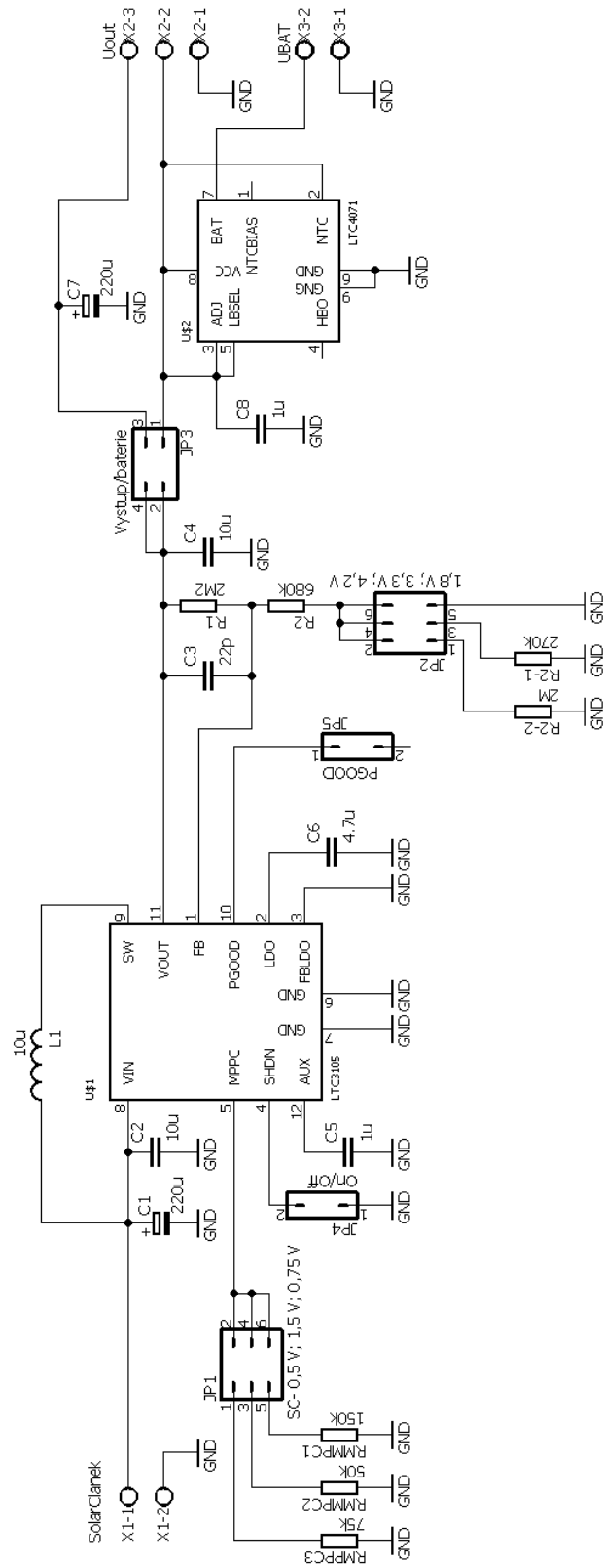
Rozměr desky 40 x 45 [mm], měřítko M1:1

A.4.3 Osazený přípravek – top

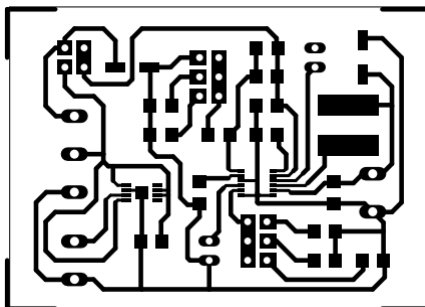


A.5 Solární nabíječka s LTC3105 a LTC4071

A.5.1 Obvodové zapojení



A.5.2 Deska plošných spojů – bottom (strana spojů)

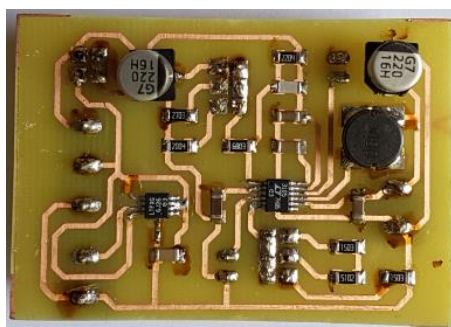


Rozměr desky 56 x 40 [mm], měřítko M1:1

A.5.3 Osazený přípravek – top



A.5.4 Osazený přípravek – bottom



B SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Proudový zdroj s jedním LT3080 a výstupním proudem 0 až 1 A

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	1u	C1206	Keramický kondenzátor 10 % YAGEO
C2	10u	C1206	Keramický kondenzátor 10 % SAMSUNG
JP1	JP5Q	2,54 x 2,54	Oboustranný kolík S2G20 (Jumper)
R1	0R1	0411/12	Metal oxidový rezistor RMO 2 W 5 %
R2	2k4	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
R3	3k6	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
R4	4k7	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
R5	5k6	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
R6	6k	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
U\$1	-	TO220-51	LT3080
X1	UCC	W237-102	Vstupní svorkovnice šroubovací
X2	LD	W237-102	Výstupní svorkovnice šroubovací

B.2 Proudový zdroj se dvěma LT3080 a výstupním proudem 0 až 2 A

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	1u	C1206	Keramický kondenzátor 10 % YAGEO
C2	10u	C1206	Keramický kondenzátor 10 % SAMSUNG
C3	1u	C1206	Keramický kondenzátor 10 % YAGEO
JP1	JP5Q	2,54 x 2,54	Oboustranný kolík S2G20 (Jumper)
R1	0R1	0411/12	Metal oxidový rezistor RMO 2 W 5 %
R2	0R1	0411/12	Metal oxidový rezistor RMO 2 W 5 %
R3	1k	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
R4	1k2	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
R5	2k4	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
R6	3k6	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
R7	4k7	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
U\$1	-	TO220-51	LT3080
U\$2	-	TO220-51	LT3080
X1	UCC	W237-102	Vstupní svorkovnice šroubovací
X2	LD	W237-102	Výstupní svorkovnice šroubovací

B.3 FV pole – paralelní zapojení

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
FV1	-	-	KXOB22-04X3F
FV2	-	-	KXOB22-04X3F
FV3	-	-	KXOB22-04X3F
UFV	-	W237-102	Výstupní svorkovnice šroubovací

B.4 FV pole – sériové zapojení

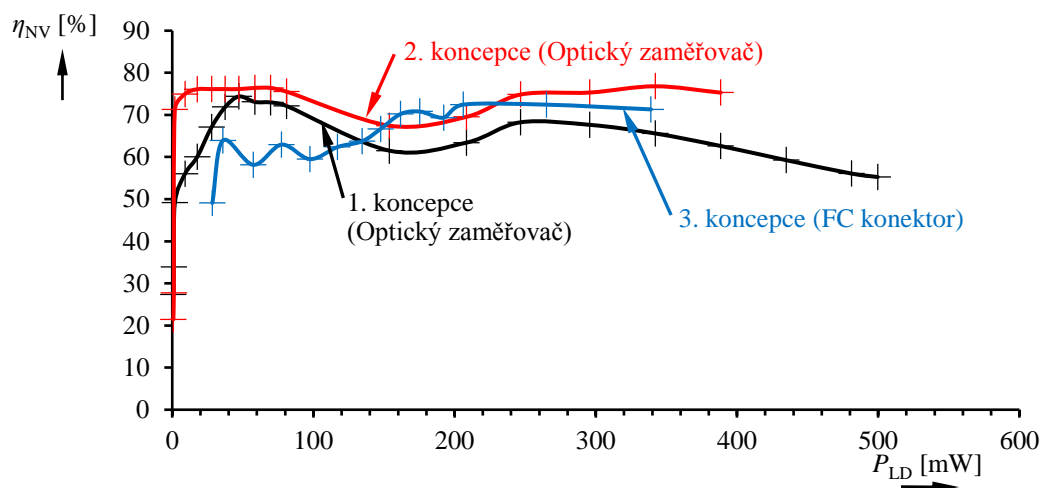
Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
FV1	-	-	KXOB22-12X1F
FV2	-	-	KXOB22-12X1F
FV3	-	-	KXOB22-12X1F
UFV	-	W237-102	Výstupní svorkovnice šroubovací

B.5 Solární nabíječka s LTC3105 a LTC4071

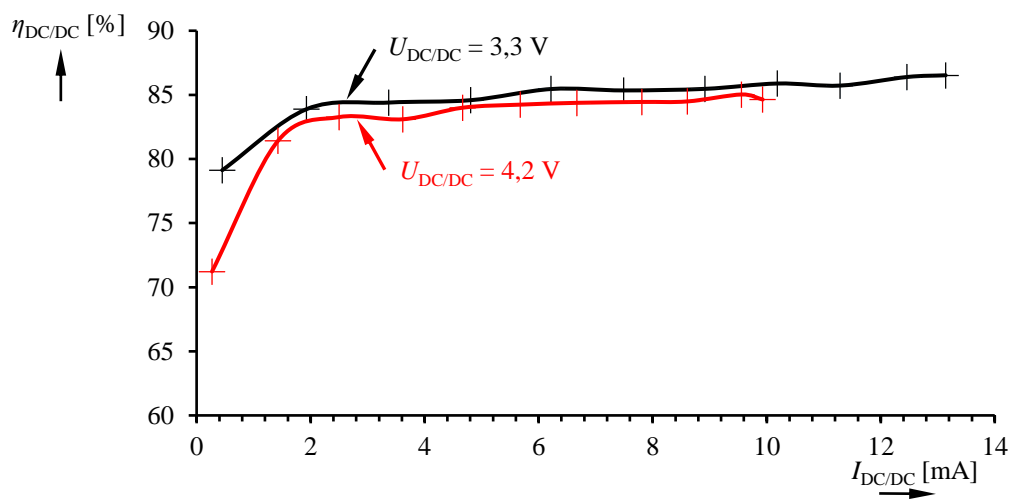
Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	220u	C8	Elektrolytický kondenzátor CES 16VIT HIT-EZV
C2	10u	C1206	Keramický kondenzátor 10 % SAMSUNG
C3	22p	C1206	Keramický kondenzátor 5 % YAGEO
C4	10u	C1206	Keramický kondenzátor 10 % SAMSUNG
C5	1u	C1206	Keramický kondenzátor 10 % YAGEO
C6	4.7u	C1206	Keramický kondenzátor 10 % SAMSUNG
C7	220u	C8	Elektrolytický kondenzátor CES 16VIT HIT-EZV
C8	1u	C1206	Keramický kondenzátor 10 % YAGEO
JP1	JP3Q	2,54 x 2,54	Oboustranný kolík S2G20 (Jumper)
JP2	JP3Q	2,54 x 2,54	Oboustranný kolík S2G20 (Jumper)
JP3	JP2Q	2,54 x 2,54	Oboustranný kolík S2G20 (Jumper)
JP4	JP1Q	2,54 x 2,54	Oboustranný kolík S2G20 (Jumper)
JP5	JP1Q	2,54 x 2,54	Oboustranný kolík S2G20 (Jumper)
L1	10u	PM75	Power Inductor PM75-100K-RC
R1	2M2	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
R2	680k	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
R2-1	270k	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
R2-2	2M	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
RMMPC1	150k	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
RMMPC2	50k	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
RMMPC3	75k	R1206	SMD Rezistor 1 % YAGEO
U\$1	-	MSOP12	LTC3105
U\$2	-	MSOP8	LTC4071
X1	SolarClanek	W237-102	Vstupní svorkovnice šroubovací
X2	Uout	W237-103	Výstupní svorkovnice šroubovací
X3	UBAT	W237-102	Výstupní svorkovnice šroubovací

C ZMĚŘENÉ CHARAKTERISTIKY

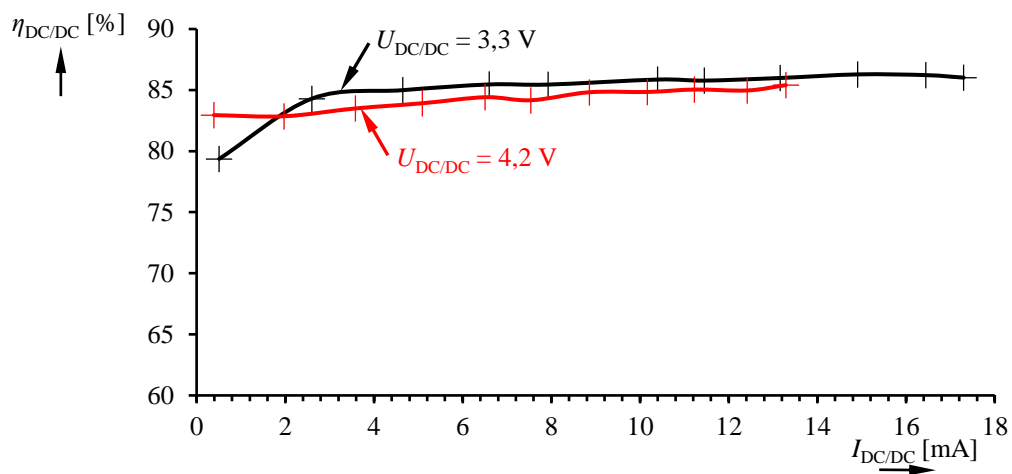
C.1 Účinnosti navázání optického výkonu do vlákna



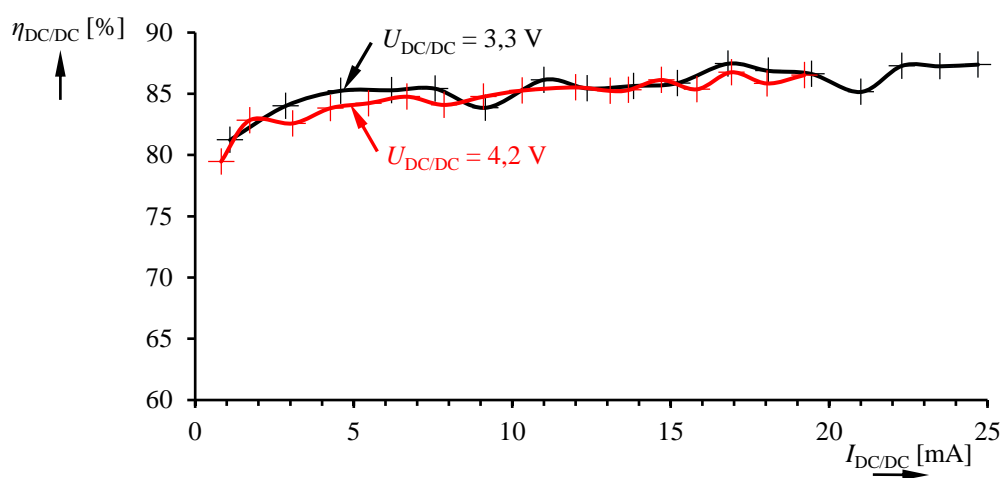
C.2 Účinnosti DC/DC konvertoru v první koncepci zdroje PoF



C.3 Účinnosti DC/DC konvertoru ve druhé koncepci zdroje PoF

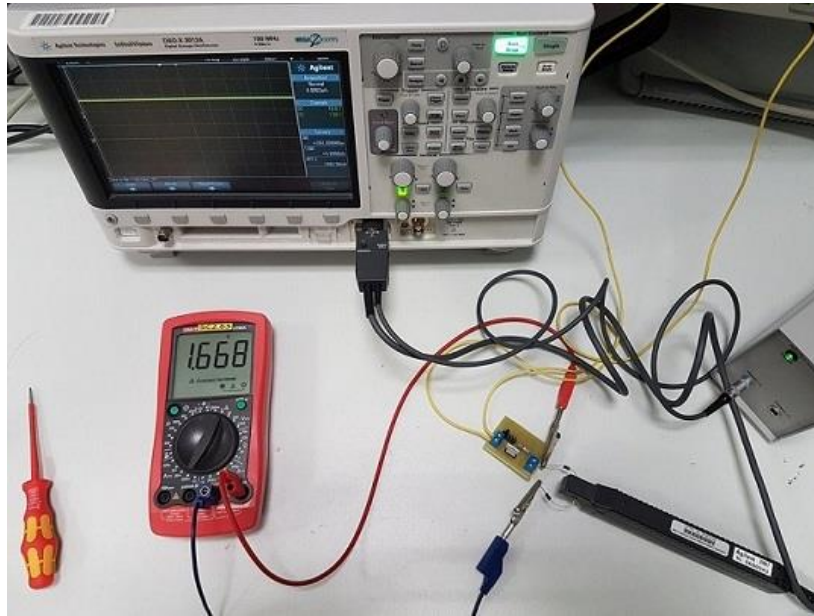


C.4 Účinnosti DC/DC konvertoru ve třetí koncepci zdroje PoF



D MĚŘÍCÍ PRACOVISTĚ

D.1 Ověření funkčnosti proudových zdrojů



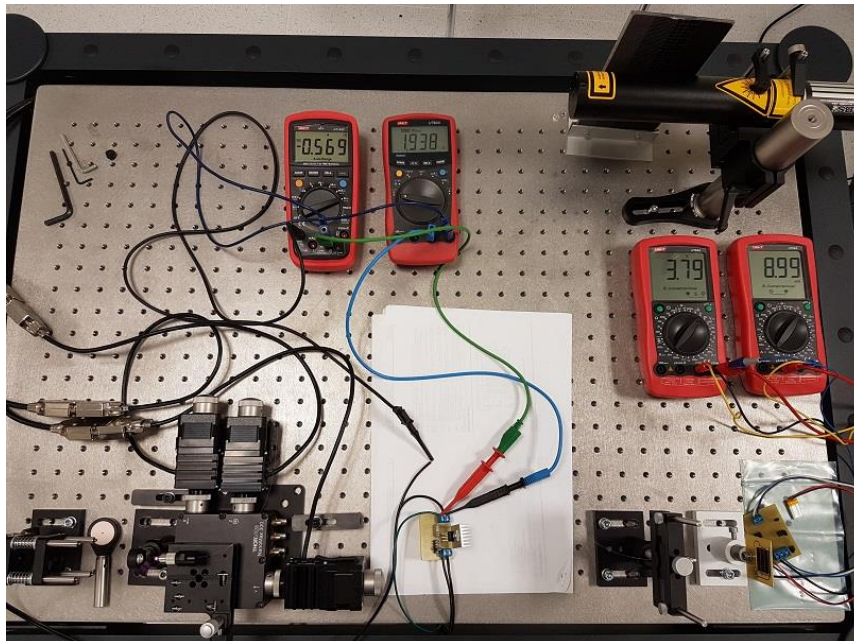
D.2 Navázání optického výkonu do 105 μm vlákna



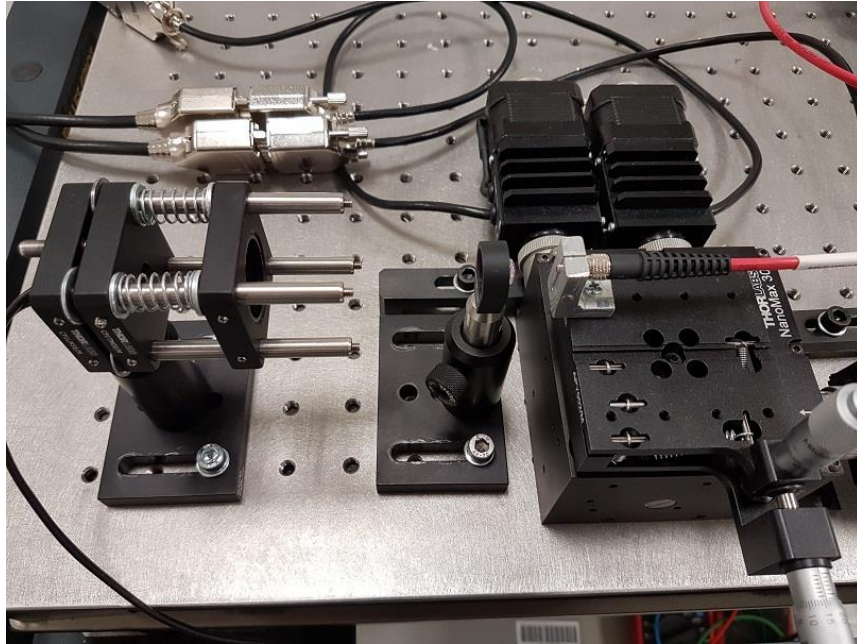
D.3 Ozáření FV pole



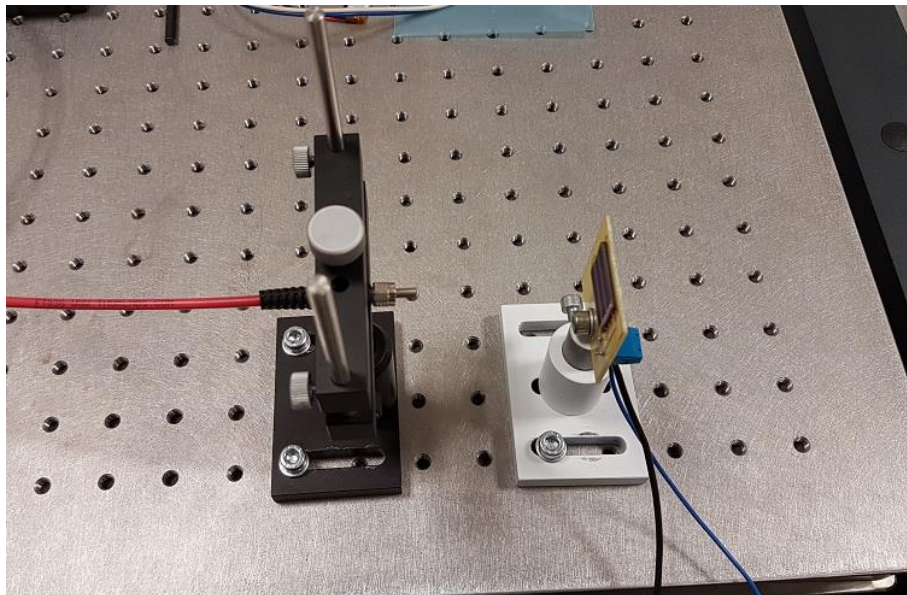
D.4 Celý systém první koncepce zdroje PoF



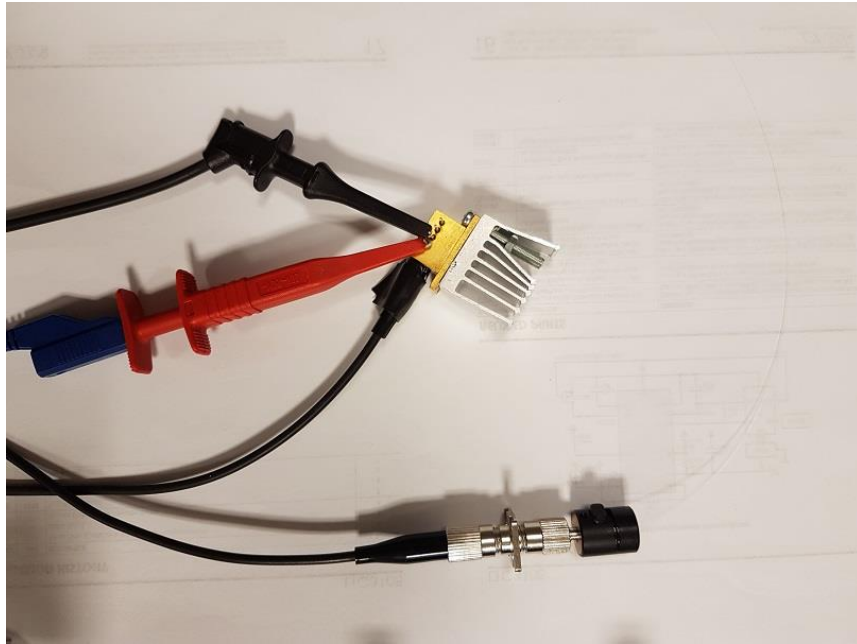
D.5 Navázání optického výkonu do 1000 μm vlákna



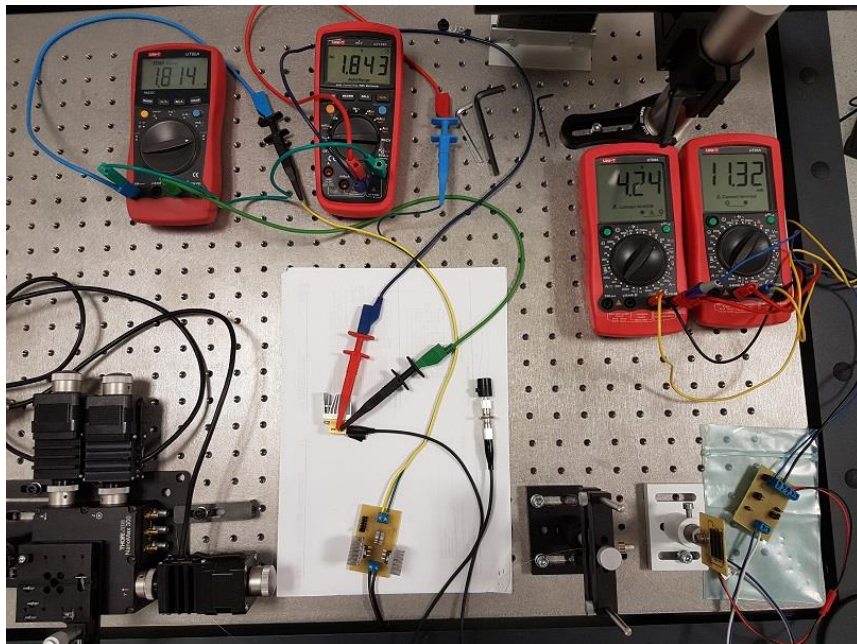
D.6 Uchycení 1000 μm optického vlákna vzhledem k FV poli



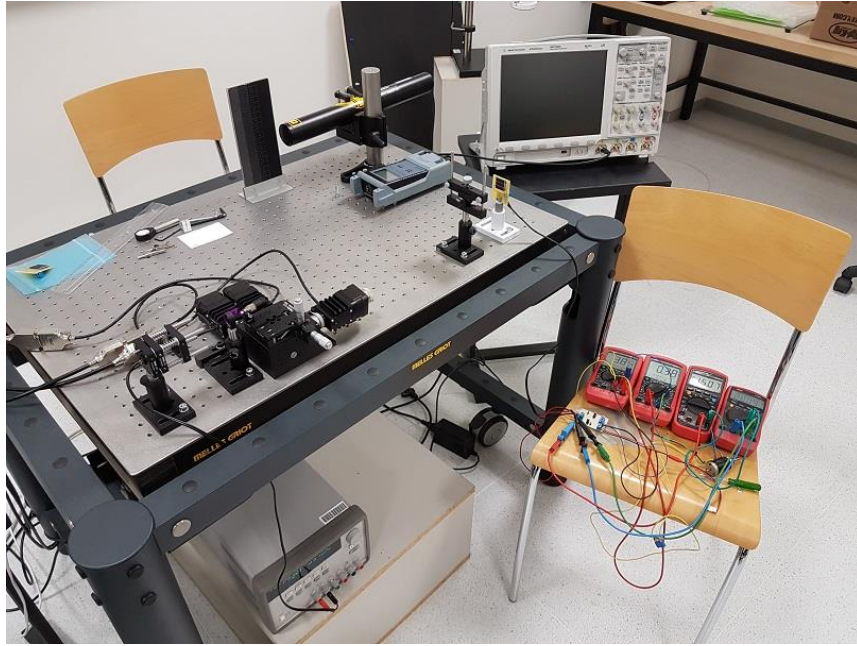
D.7 Navázání optického výkonu z 1,4 W LD do 105 μm vlákna



D.8 Celý systém třetí koncepce zdroje PoF



D.9 Měření výkonových charakteristik



E TABULKY ZMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT

E.1 První koncepce zdroje PoF

E.1.1 Výstupní optický výkon a účinnost LD

I_{LD} [mA]	U_{LD} [V]	P_{0-LD} [mW]	P_{780} [dBm]	P_{850} [dBm]	P_{LD} [mW]	η_{LD} [%]
50	1,608	80,4	-1,35	-2,9	0,79	0,99
60	1,616	96,96	0,25	-1,25	1,15	1,19
70	1,625	113,75	2,4	0,75	1,87	1,64
80	1,635	130,8	9,25	7,55	9,01	6,89
90	1,645	148,05	12,15	10,5	17,63	11,91
100	1,657	165,7	14,1	12,55	27,83	16,79
110	1,663	182,93	15,4	13,85	37,54	20,52
120	1,671	200,52	16,4	14,85	47,26	23,57
130	1,677	218,01	17,35	15,75	58,60	26,88
140	1,684	235,76	18,1	16,5	69,64	29,54
150	1,69	253,5	18,75	17,15	80,88	31,91
200	1,722	344,4	21,05	20,85	153,85	44,67
250	1,753	438,25	22,5	21,95	208,37	47,55
300	1,782	534,6	23,25	22,65	246,60	46,13
350	1,809	633,15	-	-	295,68	46,70
400	1,836	734,4	-	-	342,05	46,58
450	1,862	837,9	-	-	388,42	46,36
500	1,887	943,5	-	-	434,79	46,08
550	1,91	1050,5	-	-	481,16	45,80
570	1,919	1093,83	-	-	499,71	45,68

P_{780} – Optický výkon P_{LD} změřený na vlnové délce 780 nm.

P_{850} – Optický výkon P_{LD} změřený na vlnové délce 850 nm.

E.1.2 Účinnost navázání výkonu do vlákna

I_{LD} [mA]	P_{LD} [mW]	P_{780} [dBm]	P_{850} [dBm]	P_{in} [mW]	η_{NV} [%]
50	0,79	-6,1	-7,6	0,22	27,33
60	1,15	-3,55	-5,05	0,39	33,88
70	1,87	0,2	-1,4	0,92	49,16
80	9,01	7,6	6	5,05	55,99
90	17,63	10,8	9,25	10,58	60,00
100	27,83	13,25	11,75	18,67	67,08
110	37,54	14,85	13,35	26,98	71,88
120	47,26	15,9	14,7	35,15	74,38
130	58,60	16,95	15,15	42,82	73,08
140	69,64	17,6	16,1	50,82	72,98
150	80,88	18,2	16,7	58,35	72,14
200	153,85	20,3	18,8	94,63	61,51

I_{LD} [mA]	P_{LD} [mW]	P_{780} [dBm]	P_{850} [dBm]	P_{In} [mW]	η_{NV} [%]
250	208,37	21,75	20,25	132,14	63,42
300	246,60	22,8	21,3	168,29	68,24
350	295,68	23,55	22,05	200,01	67,64
400	342,05	24,05	22,55	224,41	65,61
450	388,42	24,4	22,9	243,25	62,63
500	434,79	24,65	23,15	257,66	59,26
550	481,16	24,85	23,35	269,80	56,07
570	499,71	24,95	23,45	276,09	55,25

P_{780} – Optický výkon P_{In} změřený na vlnové délce 780 nm.

P_{850} – Optický výkon P_{In} změřený na vlnové délce 850 nm.

E.1.3 Účinnosti FV polí

I_{LD} [mA]	P_{In} [mW]	I_{FV1} [mA]	U_{FV1} [V]	P_{FV1} [mW]	η_{FV1} [%]	I_{FV2} [mA]	U_{FV2} [V]	P_{FV2} [mW]	η_{FV2} [%]
100	18,67	1,19	1,5	1,785	9,56	0,11	1,5	0,165	0,88
150	58,35	5,08	1,5	7,62	13,06	3,57	1,5	5,355	9,18
200	94,63	9,02	1,5	13,53	14,30	6,9	1,5	10,35	10,94
250	132,14	12,84	1,5	19,26	14,57	10,58	1,5	15,87	12,01
300	168,29	16,4	1,5	24,6	14,62	13,98	1,5	20,97	12,46
350	200,01	20,1	1,5	30,15	15,07	17,02	1,5	25,53	12,76
400	224,41	23,6	1,5	35,4	15,77	20,2	1,5	30,3	13,50
450	243,25	27,2	1,5	40,8	16,77	23,5	1,5	35,25	14,49
500	257,66	30,4	1,5	45,6	17,70	26,8	1,5	40,2	15,60
550	269,80	33,3	1,5	49,95	18,51	30	1,5	45	16,68
570	276,09	35	1,5	52,5	19,02	31,4	1,5	47,1	17,06

FV1 – FV pole složené ze tří sériově zapojených FV KXOB22-12X1F.

FV2 – FV pole složené ze tří paralelně zapojených FV KXOB22-04X3F.

E.1.4 Účinnost PoF zdroje a DC/DC konvertoru $U_{PoF} = 3,3$ V

I_{LD} [mA]	I_{FV} [mA]	U_{FV} [V]	P_{FV} [mW]	U_{PoF} [V]	I_{PoF} [mA]	P_{PoF} [mW]	$\eta_{DC/DC}$ [%]	P_{0-LD} [mW]	η_{PoF} [%]
100	1,25	1,506	1,88	3,31	0,45	1,49	79,12	165,7	0,90
150	5,04	1,511	7,62	3,31	1,93	6,39	83,89	253,5	2,52
200	8,7	1,51	13,14	3,29	3,37	11,09	84,40	344,4	3,22
250	12,39	1,51	18,71	3,29	4,81	15,82	84,58	438,25	3,61
300	15,88	1,508	23,95	3,29	6,22	20,46	85,45	534,6	3,83
350	19,16	1,507	28,87	3,29	7,49	24,64	85,34	633,15	3,89
400	22,8	1,506	34,34	3,29	8,92	29,35	85,47	734,4	4,00
450	25,92	1,506	39,04	3,29	10,19	33,53	85,88	837,9	4,00
500	28,81	1,504	43,33	3,29	11,29	37,14	85,72	943,5	3,94
550	31,55	1,504	47,45	3,29	12,46	40,99	86,39	1050,5	3,90
570	33,22	1,504	49,96	3,29	13,14	43,23	86,53	1093,83	3,95

E.1.5 Účinnost PoF zdroje a DC/DC konvertoru $U_{PoF} = 4,2$ V

I_{LD} [mA]	I_{FV} [mA]	U_{FV} [V]	P_{FV} [mW]	U_{PoF} [V]	I_{PoF} [mA]	P_{PoF} [mW]	$\eta_{DC/DC}$ [%]	P_{0-LD} [mW]	η_{PoF} [%]
100	1,05	1,52	1,60	4,21	0,27	1,14	71,22	165,7	0,69
150	4,88	1,515	7,39	4,21	1,43	6,02	81,43	253,5	2,37
200	8,36	1,512	12,64	4,21	2,5	10,53	83,27	344,4	3,06
250	12,13	1,512	18,34	4,21	3,62	15,24	83,10	438,25	3,48
300	15,48	1,512	23,41	4,21	4,67	19,66	84,00	534,6	3,68
350	18,8	1,51	28,39	4,21	5,68	23,91	84,24	633,15	3,78
400	22,04	1,51	33,28	4,21	6,67	28,08	84,38	734,4	3,82
450	25,82	1,508	38,94	4,21	7,81	32,88	84,45	837,9	3,92
500	28,47	1,507	42,90	4,21	8,61	36,25	84,49	943,5	3,84
550	31,41	1,507	47,33	4,21	9,56	40,25	85,03	1050,5	3,83
570	32,8	1,506	49,40	4,21	9,93	41,81	84,63	1093,83	3,82

E.2 Druhá koncepce zdroje PoF

E.2.1 Účinnost navázání výkonu do vlákna

I_{LD} [mA]	P_{LD} [mW]	P_{780} [dBm]	P_{850} [dBm]	P_{in} [mW]	η_{NV} [%]
50	0,79	-7,2	-8,55	0,17	21,45
60	1,15	-4,45	-5,85	0,32	27,75
70	1,87	1,75	0,35	1,33	71,28
80	9,01	8,85	7,3	6,75	74,94
90	17,63	11,8	10,35	13,42	76,10
100	27,83	13,8	12,3	21,19	76,14
110	37,54	15,1	13,6	28,58	76,14
120	47,26	16,1	14,6	35,98	76,14
130	58,60	17,05	15,55	44,78	76,42
140	69,64	17,8	16,3	53,22	76,42
150	80,88	18,4	16,9	61,10	75,54
200	153,85	20,7	19,2	103,76	67,44
250	208,37	22,15	20,65	144,89	69,54
300	246,60	23,2	21,7	184,52	74,83
350	295,68	24	22,55	222,67	75,31
400	342,05	24,75	23,2	262,69	76,80
450	388,42	25,2	23,7	292,45	75,29

P_{780} – Optický výkon P_{in} změřený na vlnové délce 780 nm.

P_{850} – Optický výkon P_{in} změřený na vlnové délce 850 nm.

E.2.2 Účinnost PoF zdroje a DC/DC konvertoru $U_{PoF} = 3,3$ V

I_{LD} [mA]	I_{FV} [mA]	U_{FV} [V]	P_{FV} [mW]	U_{PoF} [V]	I_{PoF} [mA]	P_{PoF} [mW]	$\eta_{DC/DC}$ [%]	P_{0-LD} [mW]	η_{PoF} [%]
100	1,4	1,51	2,11	3,29	0,51	1,68	79,37	165,7	1,01
150	6,72	1,51	10,15	3,29	2,6	8,55	84,30	253,5	3,37
200	11,92	1,51	18,00	3,29	4,65	15,30	85,00	344,4	4,44
250	16,86	1,507	25,41	3,29	6,6	21,71	85,46	438,25	4,95
300	20,26	1,507	30,53	3,29	7,93	26,09	85,45	534,6	4,88
350	26,46	1,506	39,85	3,29	10,4	34,22	85,86	633,15	5,40
400	29,2	1,504	43,92	3,29	11,45	37,67	85,78	734,4	5,13
450	33,5	1,503	50,35	3,29	13,16	43,30	85,99	837,9	5,17
500	37,9	1,5	56,85	3,29	14,91	49,05	86,29	943,5	5,20
550	41,9	1,498	62,77	3,29	16,45	54,12	86,23	1050,5	5,15
570	44,2	1,497	66,17	3,29	17,3	56,92	86,02	1093,83	5,20

E.2.3 Účinnost PoF zdroje a DC/DC konvertoru $U_{PoF} = 4,2$ V

I_{LD} [mA]	I_{FV} [mA]	U_{FV} [V]	P_{FV} [mW]	U_{PoF} [V]	I_{PoF} [mA]	P_{PoF} [mW]	$\eta_{DC/DC}$ [%]	P_{0-LD} [mW]	η_{PoF} [%]
100	1,3	1,519	1,97	4,2	0,39	1,64	82,95	165,7	0,99
150	6,6	1,513	9,99	4,2	1,97	8,27	82,86	253,5	3,26
200	11,91	1,512	18,01	4,2	3,58	15,04	83,50	344,4	4,37
250	16,87	1,51	25,47	4,2	5,09	21,38	83,92	438,25	4,88
300	21,45	1,51	32,39	4,2	6,51	27,34	84,42	534,6	5,11
350	24,95	1,508	37,62	4,2	7,54	31,67	84,17	633,15	5,00
400	29,13	1,506	43,87	4,2	8,86	37,21	84,82	734,4	5,07
450	33,45	1,505	50,34	4,2	10,17	42,71	84,85	837,9	5,10
500	36,9	1,503	55,46	4,2	11,23	47,17	85,04	943,5	5,00
550	40,9	1,501	61,39	4,2	12,42	52,16	84,97	1050,5	4,97
570	43,6	1,499	65,36	4,2	13,29	55,82	85,41	1093,83	5,10

E.3 Třetí koncepce zdroje PoF

E.3.1 Výstupní optický výkon a účinnost LD

I_{LD} [mA]	U_{LD} [V]	P_{0-LD} [mW]	P_{850} [dBm]	P_{1300} [dBm]	P_{LD} [mW]	η_{LD} [%]
50	1,259	63,0	-16,55	-22,05	0,0	0,03
100	1,298	129,8	-11,9	-17,4	0,1	0,04
150	1,326	198,9	-8,5	-14	0,1	0,06
200	1,35	270,0	-5,4	-10,85	0,2	0,08
250	1,371	342,8	-2	-7,55	0,5	0,15
300	1,385	415,5	15,55	10	28,4	6,84
320	1,388	444,2	16,55	11,05	35,8	8,06
340	1,392	473,3	18,6	13,1	57,4	12,13
360	1,396	502,6	19,9	14,4	77,4	15,41
380	1,4	532,0	20,9	15,4	97,5	18,33
400	1,405	562,0	21,7	16,15	117,1	20,83
420	1,41	592,2	22,3	16,8	134,6	22,73
440	1,419	624,4	22,7	17,2	147,6	23,64
460	1,427	656,4	23,1	17,55	161,6	24,62
480	1,435	688,8	23,45	17,95	175,4	25,46
500	1,433	716,5	23,85	18,35	192,3	26,84
520	1,442	749,8	24,15	18,65	206,1	27,48
600	1,457	874,2			265,2	30,33
700	1,481	1036,7			339,1	32,71
800	1,506	1204,8			413,0	34,28
900	1,532	1378,8			486,9	35,31
1000	1,555	1555,0			560,8	36,07
1100	1,579	1736,9			634,7	36,54
1200	1,602	1922,4			708,6	36,86
1300	1,626	2113,8			782,6	37,02
1400	1,65	2310,0			856,5	37,08
1500	1,674	2511,0			930,4	37,05
1600	1,698	2716,8			1004,3	36,97
1700	1,722	2927,4			1078,2	36,83
1800	1,745	3141,0			1152,1	36,68
1900	1,769	3361,1			1226,0	36,48
2000	1,793	3586,0			1299,9	36,25

P_{850} – Optický výkon P_{LD} změřený na vlnové délce 850 nm.

P_{1300} – Optický výkon P_{LD} změřený na vlnové délce 1300 nm.

E.3.2 Účinnost navázání výkonu do vlákna

$I_{LD}[\text{mA}]$	$P_{LD} [\text{mW}]$	$P_{850} [\text{dBm}]$	$P_{1300} [\text{dBm}]$	$P_{In} [\text{mW}]$	$\eta_{NV} [\%]$
300	28,4	9,45	4	13,9	49,09
320	35,8	11,6	6,15	22,9	63,90
340	57,4	13,25	7,7	33,4	58,14
360	77,4	14,9	9,3	48,8	62,95
380	97,5	15,65	10,1	58,0	59,50
400	117,1	16,65	11,1	73,0	62,37
420	134,6	17,35	11,8	85,8	63,75
440	147,6	17,95	12,35	98,4	66,68
460	161,6	18,45	13,9	113,4	70,19
480	175,4	18,95	13,45	124,2	70,79
500	192,3	19,25	13,85	133,4	69,35
520	206,1	19,75	14,25	149,3	72,44
600	265,2	20,85	15,3	192,1	72,44
700	339,1	21,85	16,3	241,8	71,32
800	413,0			308,6	74,73
900	486,9			367,5	75,48
1000	560,8			426,4	76,03
1100	634,7			485,3	76,46
1200	708,6			544,2	76,79
1300	782,6			603,1	77,07
1400	856,5			662,0	77,29
1500	930,4			720,9	77,48
1600	1004,3			779,7	77,64
1700	1078,2			838,6	77,78
1800	1152,1			897,5	77,90
1900	1226,0			956,4	78,01
2000	1299,9			1015,3	78,10

P_{850} – Optický výkon P_{In} změřený na vlnové délce 850 nm.

P_{1300} – Optický výkon P_{In} změřený na vlnové délce 1300 nm.

E.3.3 Účinnosti FV polí

I_{LD} [mA]	P_{In} [mW]	I_{FV1} [mA]	U_{FV1} [V]	P_{FV1} [mW]	η_{FV1} [%]	I_{FV2} [mA]	U_{FV2} [V]	P_{FV2} [mW]	η_{FV2} [%]
400	73,0	2,66	1,5	3,99	5,46	1,5	1,5	2,25	3,08
500	133,4	6,58	1,5	9,87	7,40	5,8	1,5	8,70	6,52
600	192,1	11,75	1,5	17,63	9,18	9,9	1,5	14,85	7,73
700	241,8	15,95	1,5	23,93	9,89	13,9	1,5	20,85	8,62
800	308,6	19,51	1,5	29,27	9,48	16,8	1,5	25,20	8,17
900	367,5	23,5	1,5	35,25	9,59	21,6	1,5	32,40	8,82
1000	426,4	28,2	1,5	42,30	9,92	25,4	1,5	38,10	8,94
1100	485,3	32,2	1,5	48,30	9,95	29	1,5	43,50	8,96
1200	544,2	37,1	1,5	55,65	10,23	33,1	1,5	49,65	9,12
1300	603,1	41,2	1,5	61,80	10,25	37,3	1,5	55,95	9,28
1400	662,0	46,1	1,5	69,15	10,45	40,3	1,5	60,45	9,13
1500	720,9	50,3	1,5	75,45	10,47	44,3	1,5	66,45	9,22
1600	779,7	55	1,5	82,50	10,58	47,9	1,5	71,85	9,21
1700	838,6	58,7	1,5	88,05	10,50	51,5	1,5	77,25	9,21
1800	897,5	63,2	1,5	94,80	10,56	54,4	1,5	81,60	9,09
1900	956,4	66,6	1,5	99,90	10,45	58,4	1,5	87,60	9,16
2000	1015,3	70,7	1,5	106,05	10,45	62,2	1,5	93,30	9,19

FV1 – FV pole složené ze tří sériově zapojených FV KXOB22-12X1F.

FV2 – FV pole složené ze tří paralelně zapojených FV KXOB22-04X3F.

E.3.4 Účinnost PoF zdroje a DC/DC konvertoru $U_{PoF} = 3,3$ V

I_{LD} [mA]	I_{FV} [mA]	U_{FV} [V]	P_{FV} [mW]	U_{PoF} [V]	I_{PoF} [mA]	P_{PoF} [mW]	$\eta_{DC/DC}$ [%]	P_{0-LD} [mW]	η_{PoF} [%]
400	2,93	1,516	4,44	3,28	1,1	3,61	81,23	562,0	0,64
500	7,37	1,51	11,13	3,28	2,85	9,35	84,00	716,5	1,30
600	11,74	1,509	17,72	3,29	4,59	15,10	85,24	874,2	1,73
700	15,85	1,509	23,92	3,29	6,2	20,40	85,28	1036,7	1,97
800	19,31	1,51	29,16	3,29	7,57	24,91	85,41	1204,8	2,07
900	23,8	1,51	35,94	3,29	9,16	30,14	83,86	1378,8	2,19
1000	27,88	1,507	42,02	3,29	11	36,19	86,14	1555,0	2,33
1100	31,63	1,506	47,63	3,29	12,37	40,70	85,44	1736,9	2,34
1200	35,28	1,506	53,13	3,29	13,83	45,50	85,64	1922,4	2,37
1300	38,9	1,499	58,31	3,29	15,22	50,07	85,87	2113,8	2,37
1400	42,3	1,495	63,24	3,29	16,81	55,30	87,45	2310,0	2,39
1500	45,8	1,495	68,47	3,29	18,08	59,48	86,87	2511,0	2,37
1600	50,5	1,463	73,88	3,29	19,45	63,99	86,61	2716,8	2,36
1700	55,5	1,462	81,14	3,29	21	69,09	85,15	2927,4	2,36
1800	57,3	1,467	84,06	3,29	22,3	73,37	87,28	3141,0	2,34
1900	60	1,477	88,62	3,29	23,5	77,32	87,24	3361,1	2,30
2000	62,5	1,488	93,00	3,29	24,7	81,26	87,38	3586,0	2,27

E.3.5 Účinnost PoF zdroje a DC/DC konvertoru $U_{PoF} = 4,2$ V

I_{LD} [mA]	I_{FV} [mA]	U_{FV} [V]	P_{FV} [mW]	U_{PoF} [V]	I_{PoF} [mA]	P_{PoF} [mW]	$\eta_{DC/DC}$ [%]	P_{0-LD} [mW]	η_{PoF} [%]
400	2,85	1,517	4,32	4,19	0,82	3,44	79,47	562,0	0,61
500	5,76	1,514	8,72	4,2	1,72	7,22	82,84	716,5	1,01
600	10,36	1,512	15,66	4,2	3,08	12,94	82,58	874,2	1,48
700	14,15	1,512	21,39	4,2	4,27	17,93	83,82	1036,7	1,73
800	18,04	1,512	27,28	4,2	5,47	22,97	84,23	1204,8	1,91
900	21,95	1,508	33,10	4,2	6,68	28,06	84,76	1378,8	2,03
1000	26	1,508	39,21	4,2	7,85	32,97	84,09	1555,0	2,12
1100	29,95	1,504	45,04	4,2	9,09	38,18	84,76	1736,9	2,20
1200	33,8	1,504	50,84	4,2	10,32	43,34	85,26	1922,4	2,25
1300	39,29	1,5	58,94	4,2	12	50,40	85,52	2113,8	2,38
1400	43	1,5	64,50	4,2	13,09	54,98	85,24	2310,0	2,38
1500	44,9	1,499	67,31	4,2	13,67	57,41	85,30	2511,0	2,29
1600	49	1,464	71,74	4,2	14,71	61,78	86,12	2716,8	2,27
1700	53,2	1,464	77,88	4,2	15,83	66,49	85,36	2927,4	2,27
1800	55,8	1,468	81,91	4,2	16,92	71,06	86,75	3141,0	2,26
1900	59,8	1,476	88,26	4,2	18,04	75,77	85,84	3361,1	2,25
2000	62,7	1,488	93,30	4,2	19,22	80,72	86,52	3586,0	2,25