

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

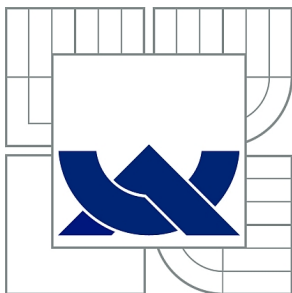
MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ OPTICKÝCH DETEKTORŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

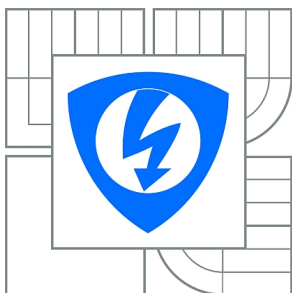
Bc. MARTIN SMRŽ

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ OPTICKÝCH DETEKTORŮ

MEASUREMENT OF OPTIC DETECTOR PROPERTIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

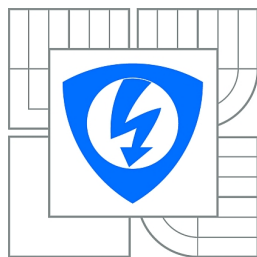
Bc. MARTIN SMRŽ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN ODSTRČILÍK, Ph.D.

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav biomedicínského inženýrství

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Biomedicínské inženýrství a bioinformatika

Student: Bc. Martin Smrž

ID: 133985

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Měření vlastností optických detektorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Seznamte se s laboratorními komponentami určenými pro měření vlastností optických detektorů a prostudujte principy vybraných detektorů. 2) Navrhněte a sestavte z těchto komponent laboratorní úlohu do předmětu Mikroskopická zobrazovací technika. 3) Navrhněte měření vybraných parametrů a proveďte ověření funkčnosti sestavené úlohy. 4) Vytvořte návod pro laboratorní úlohu, která bude zaměřena na měření a srovnání vlastností optických detektorů, včetně materiálů pro teoretický popis úlohy a vypracovaného protokolu z měření. 5) Diskutujte dosažené výsledky a srovnajte s teoretickými předpoklady. 6) Navrhněte rozšíření vytvořené laboratorní úlohy, včetně soupisu dalších komponent pro toto rozšíření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] JAN, J. Medical Image Processing, Reconstruction and Restoration - Concepts and Methods. CRC Tylor and Francis, New York, 2005.

[2] MURPHY, D.B. Fundamentals of light microscopy and electronic imaging. Wiley, New York, 2010.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 22.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Jan Odstrčilík, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce: doc. Ing. Radim Kolář, Ph.D.

prof. Ing. Ivo Provazník, 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:

Cílem této diplomové práce je seznámit se s laboratorními komponenty určenými pro měření vlastností optických detektorů, nastudovat princip funkce jednotlivých senzorů a naučit se obsluhovat měřicích zařízení. Na základě těchto poznatků budou proměřeny spektrální, přenosové a dynamické charakteristiky jednotlivých detektorů. Výstupem práce bude návrh laboratorní úlohy pro předmět Mikroskopická zobrazovací technika, vyučovaný v prvním semestru navazujícího magisterského studia oboru Biomedicínské inženýrství a bioinformatika na ÚBMI, FEKT, VUT v Brně.

Klíčová slova:

Detektor, měřicí technika, optický, laboratorní úloha.

Abstract:

Purpose of this master thesis is get acquainted with laboratory components designated for measurment of optical detectors, study principials of function of each detector and learn how to work with measuring machines. On the base of this knowledge will be measured spectral, frequency and dynamic characteristics of each detectors. The outcome of the thesis will draft of the laboratory exercise for subject Microscopy imaging technique teaching at the first semestr of follow-up masters studies of Biomedical engineering and bioinformatics at DBME, FEEC, Brno University of technology.

Keyword:

Detector, measurement technique, optical, laboratory exercise.

Bibliografická citace mé práce:

SMRŽ, M. Měření vlastností optických detektorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 80 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Odstrčilík, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měření vlastností optických detektorů 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 tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 22. května 2015

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Janu Odstrčilíkovi, PhD., za ochotný přístup při řešení problémů a za cenné odborné i organizační rady. Dále bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Radimu Kolářovi, PhD. za možnost konzultací v průběhu celého roku, panu Ing. Vratislavu Harabišovi PhD. za zapůjčení generátoru a osciloskopu a také doc. Ing. Milanu Chmelařovi, CSc. za poskytnutí dílenských prostor a vybavení. Tímto se omlouvám za zanechání dílny v nedostatečně uklizeném stavu. Velký dík také patří Dr. Simonu Sindbertovi z technické podpory firmy Thorlabs® za osvětlení nejasností vzniklých při měření s detektory. V neposlední řadě patří mé díky Ústavu biomedicínského inženýrství za poskytnutí prostoru a veškerého vybavení pro realizaci mé diplomové práce.

V Brně dne 22. května 2015

.....
podpis autora

Obsah

1 Úvod	6
2 Fyzikální principy	7
2.1 Světlo	7
2.2 Optická vlákna	10
2.3 Fotoelektrický jev	13
3 Detektory.....	16
3.1 Vlastnosti optických detektorů	16
3.2 Fotonásobič	18
3.3 Fotodioda.....	20
3.4 Lavinová fotodioda	21
3.5 LED dioda	22
4 Návrh pracoviště.....	23
4.1 Blokové schéma.....	23
4.2 Zdrojová část	25
4.3 Optická část	28
4.4 Detekční část	32
5 Ověření funkčnosti	39
5.1 Zdroj a optická vlákna.....	39
5.2 Statické vlastnosti	44
5.2.1 Ověření funkčnosti detektorů	45
5.2.2 Přenosové charakteristiky.....	51
5.3 Dynamické vlastnosti.....	59
5.3.1 Náběžné a sestupné hrany	59
5.3.2 Čas odezvy.....	64
5.4 Diskuze dosažených výsledků	67
6 Závěr	72
Seznam literatury.....	73
Seznam obrázků	75
Seznam tabulek	78
Seznam příloh na CD.....	80

1 Úvod

Úkolem této diplomové práce je seznámit se se základním principem a obsluhou komponent pro měření vlastností optických detektorů. Pro tento účel byly pořízeny čtyři detektory elektromagnetického záření od firmy Thorlabs®, a to lavinová fotodioda, fotonásobič a dvě jednoduché fotodiody pracující v odlišných režimech. Na základě získaných znalostí bude navržena laboratorní úloha do předmětu Mikroskopická zobrazovací technika, vyučovaný v prvním semestru navazujícího magisterského studia oboru Biomedicínské inženýrství a bioinformatika na ÚBMI, FEKT, VUT v Brně.

V teoretické části bude práce pojednávat o základních fyzikálních poznatcích o elektromagnetickém záření, fotoelektrickém jevu, principu a využití optických vláken v datových sítích. Samostatná kapitola se věnuje vlastnostem a principu funkce jednotlivých detektorů a LED diody.

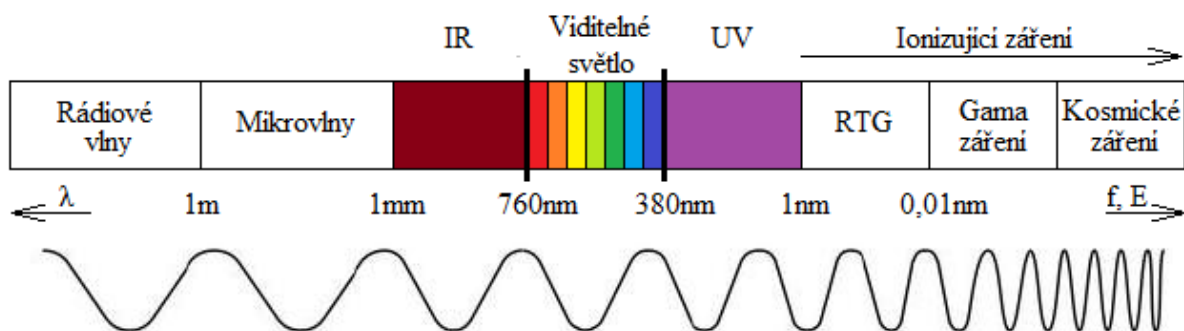
Praktická část práce se bude zabývat ověřením funkčnosti jednotlivých komponent, detektorů i samotné navržené soustavy. U zdroje světla se bude práce věnovat jeho časové stabilitě a vyzařovací charakteristice, bude proměřen útlum použitých optických vláken i celé soustavy. U detektorů budou proměřeny statické i dynamické charakteristiky a jejich vztah s frekvencí dopadající na citlivou plochu senzoru. V závěru práce bude zhodnocena funkčnost celé měřicí soustavy, popsány možné chyby měření a návrh případných úprav. Taktéž se zhodnotí, zda vlastnosti pozorované u optických detektorů odpovídají teoretickým předpokladům. Výstupem práce bude taktéž návrh protokolu a text domácí přípravy do předmětu Mikroskopická zobrazovací technika.

2 Fyzikální principy

Jak již sám název napovídá, v této kapitole se budeme věnovat fyzikálním principům a jevům nutným k pochopení základního fungování navržené laboratorní úlohy, a to světlu jako takovému, optickým vláknům a fotoelektrickému jevu. Bude se jednat pouze o jednoduché shrnutí, zabývat se problematikou kvantové mechaniky či vlnové optiky není účelem této práce. Kapitola tedy nastíní základní poznatky z oblasti optoelektroniky nutné pro pochopení funkčnosti optických detektorů a jejich interakci s elektromagnetickým zářením.

2.1 Světlo

Spektrum elektromagnetického záření obsahuje celou řadu vlnění s odlišnými vlastnostmi. Tyto vlastnosti se odvíjí od jeho energie, která je dána vlnovou délkou, resp. frekvencí. Vlnění s nejnižší frekvencí se používá v rádiové a telekomunikační technice, směrem k vyšším frekvencím (ke kratším vlnovým délkám) spektrum obsahuje mikrovlny, infračervené záření, viditelné světlo, ultrafialové záření, dále pak tzv. rentgenovo záření, gama paprsky a záření kosmické. Dále lze spektrum rozdělit na část ionizujícího záření (UV, RTG, Gama a kosmické), které je pro většinu živých organismů škodlivé, a záření neionizující. V této práci se budeme dále zabývat pouze zářením v rozsahu vlnových délek cca 760 až 380 nm, tedy viditelným světlem. Rozdělení elektromagnetického spektra viz obrázek 2.1. [5, 6]



Obrázek 2.1: Elektromagnetické spektrum

Hranice oddělující viditelné spektrum od infračerveného a ultrafialového záření nejsou jasně definovány, vnímání viditelného světla je silně subjektivní a různí autoři uvádí odlišné hodnoty vlnových délek pro toto spektrum. Obdobná situace je i u stanovení barvy jednotlivých vlnových délek. Důležité je zavést pojem světlo bílé, tedy světlo s rovnocenným zastoupením všech vlnových délek v celém rozsahu viditelného spektra a světla barevného, obsahující pouze jednu konkrétní vlnovou délku. Přibližné vlnové délky a frekvence pro barevné světlo jsou uvedeny v tabulce 2.1. Vztah mezi vlnovou délkou a frekvencí viz níže, vztah 2.1.

Tabulka 2.1: Vlnové délky a frekvence pro jednotlivé barvy viditelného spektra [6]

Barva	λ	f
[-]	[nm]	[THz]
červená	625 - 740	480 - 405
oranžová	590 - 625	510 - 480
žlutá	564 - 590	530 - 510
zelená	520 - 565	580 - 530
azurová	500 - 520	600 - 580
modrá	430 - 500	700 - 600

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT \text{ [nm]} \quad (2.1)$$

kde

λ	vlnová délka záření [m]
c	rychlost světla [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
f	frekvence [Hz]
T	perioda [s^{-1}]

Chování světla v odlišných situacích lze popsat pomocí hned několika způsobů. Prvním a nejstarším z nich je geometrická optika, ta se zabývá šířením nezávislého světelného paprsku homogenním prostorem, jeho chováním na rozhraní dvou látek, odrazem a lomem. Základy pro geometrickou optiku položil již v 17. století francouzský matematik Pierre de Fermat, z jehož principu vychází i Snellův zákon, viz dále. Chápání světla pomocí geometrické optiky však nedokáže popsat veškeré jevy, proto se na přelomu 18. a 19. století začala rozvíjet optika vlnová, pohlížející na světlo jako na vlnu šířící se prostorem. Díky tomuto pohledu lze vysvětlit jevy jako je difrakce, interference či polarizace světla. Základy pro vlnovou optiku byly položeny již ve století 17. nizozemským fyzikem Christiaanem Huygensem, který vyslovil tzv. huygensův princip, původně formulovaný pro vlnění pevných či kapalných látek. Jeho princip byl později použit i pro vysvětlení jevů vlnové optiky. O přesné matematické vyjádření chování světla jako vlnění se zasloužili významní matematikové 18. století jako Augustin Jean Fresnel, Jean-Baptiste Joseph Fourier a Gustav Robert Kirchhoff. S rozvojem znalosti elektřiny a magnetismu bylo zapotřebí rozšířit i znalosti o světle a jeho vztahu k okolí. K tomu přispěl anglický fyzik 19. století Michael Faraday, který demonstroval změnu polarizace světla při přiložení vnějšího magnetického pole. K nejpřesnějšímu popisu elektromagnetického záření a tím pádem i světla v rámci klasické fyziky přispěl James Clark Maxwell se souborem svým čtyř rovnic popisujících elektromagnetismus. Z pohledu klasické fyziky bylo tedy světlo dokonale popsáno a považováno za vlnění.

Považovat světlo pouze za vlnění však počátkem 20. století začalo být nedostačující, tento pohled nedokázal vysvětlit některé jevy vzniklé interakcí elektromagnetického záření

s materiálem. K tomuto účelu se začalo rozvíjet nové odvětví moderní fyziky, kvantová mechanika. Její základy položili fyzikové Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg a Niels Bohr díky popisu dějům v jádře atomu. Dospěli k názoru, že děje odehrávající se v jádře atomu jsou jak částicového, tak vlnového charakteru. To také demonstrovali na Bohrově modelu atomu. Na jejich práci navázal Max Planck, který vysvětlil čarové spektrum vodíku, a zavedl Planckovu konstantu. Předpokládal, že pohlcení i vyzáření energie z těles se děje v kvantech, nikoli spojitě. Tuto teorii dále rozvinul Albert Einstein a aplikoval ji na světlo. Vznikl tak pojem foton, tedy jakási elementární částice světla, o určité hmotnosti, pohybující se prostorem rychlostí světla. Díky těmto poznatkům mohl být popsán fotoelektrický jev, viz dále. [2, 4, 5]

Pro popis naší měřicí soustavy budeme potřebovat pouze základy optiky geometrické, pro popis šíření paprsku optickým vláknem a optiky kvantové. Nyní si ukážeme letmý nástin, co to je foton a uvedeme několik málo vztahů pro jeho energii, hybnost a hmotnost. Nejdříve si však zavedeme nutné veličiny.

Rychlost světla ve vakuu:

$$c_0 = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Planckova konstanta:

$$h = 4,13571 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$$

Energie fotonu:

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \text{ [eV]} \quad (2.2)$$

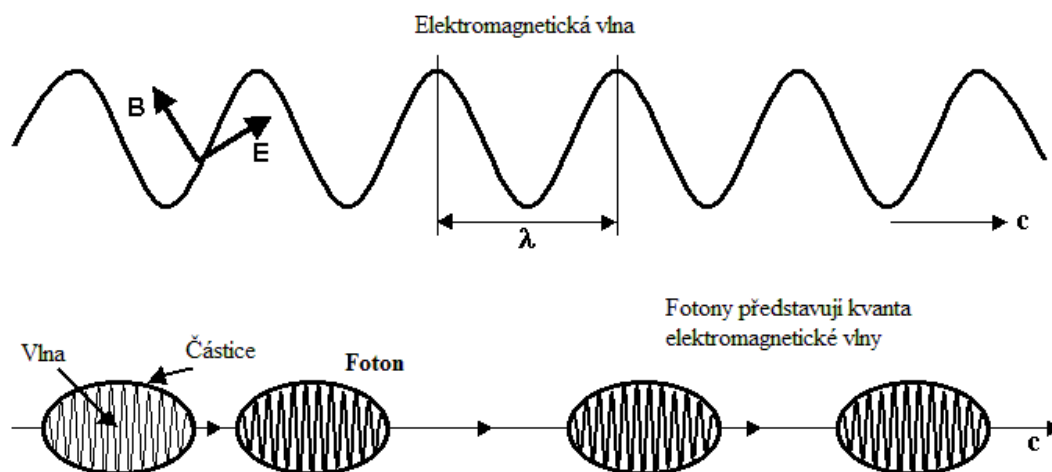
Hybnost fotonu:

$$p = \frac{h}{\lambda} \text{ [kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.3)$$

Hmotnost fotonu:

$$m = \frac{h}{c^2} \cdot f = 7,36 \cdot 10^{-51} f \text{ [kg]} \quad (2.4)$$

Z uvedených vztahů je patrné, že všechny parametry popisující foton jako takový závisí pouze na frekvenci, resp. vlnové délce. Při změně frekvence tedy dojde ke změně parametrů fotonu. Energie i hmotnost fotonu jsou tak malé, že je prakticky nelze změřit. [1, 3, 4]



Obrázek 2.2: Představa fotonu [1]

2.2 Optická vlákna

V dnešní době stále roste objem přenášených dat díky rozvoji telekomunikační a výpočetní techniky. To přineslo vyčerpání potenciálu klasických metalických kabelů pro přenos dat. Dnes stále hojně používaný kabel UTP (kroucená dvoulinka) má omezenou rychlost přenosu dat i vzdálenost pro jeho použití. Nejmodernější z těchto síťových kabelů dosahují rychlosti 10GB/s, nastává však problém s rušením okolním elektromagnetickým polem. Tato přenosová rychlost také není použitelná na větší vzdálenosti než 100m. Proto se stále rozšiřuje použití optických datových sítí. Jedná se o tenké skleněné či plastové vlákno uložené v ochranném pouzdře, které přenáší informace prostřednictvím světelného paprsku. Tento způsob transportu dat je velice rychlý, informace „letí“ téměř rychlostí světla, pohybuje se kolem 26 TB/s. Optické vlákno také umožňuje přenos dat na velké vzdálenosti, řádově stovky kilometrů, bez většího útlumu. Odpadá i vliv rušení okolním elektromagnetickým zářením, další výhodou může být větší časová stálost díky materiálu nepodléhajícímu korozi. Nevýhoda spočívá ve vyšší pořizovací ceně. [4]

Optická vlákna našla uplatnění i v biomedicínské technice, konkrétně v endoskopii. Endoskopy jsou přístroje pro pozorování útrobu pacientů. Jedná se o cca 1 metr dlouhou ohebnou trubici vybavenou třemi svazky optických vláken. Dvě vlákna slouží pro přenos světla dovnitř pacienta, zbývající pro přenos obrazu k oku lékaře. Endoskopy tak umožňují neinvazivní pohled do tělních dutin (žaludek, tlusté střevo, močový měchýř...) nebo provádění operací bez nutnosti vytvoření velké operační rány (laparoskopie). To vše díky rozvoji optických vláken. Endoskopického zařízení lze samozřejmě využít i v průmyslové praxi, pro zkoumání těžko dostupných míst či dutin u motorů, plynových turbín, strojů, potrubí či nádrží. Nyní se podíváme, jak takové optické vlákno funguje.

Princip

Optická vlákna využívají pro bezztrátové šíření elektromagnetického záření tzv. totální odraz, který vychází ze Snellova zákona. Představme si dvojici prostředí s odlišnou optickou hustotou, kterou popisuje index lomu, viz vztah (2.5). Paprsek se šíří prostředím s vyšším indexem lomu a dopadne na rozhraní s druhým, opticky řidším prostředím. Nastává tak lom světla od kolmice. Pokud bude úhel dopadu světla na rozhraní vyšší než úhel mezní, odrazí se veškeré dopadající světlo zpět do rozhraní, z kterého přišlo. Nastane tak totální odraz. Na základě tohoto zákona je zkonstruováno samotné optické vlákno. Sestává se z jádra s vyšším indexem lomu obklopeným skleněným pláštěm s nižším indexem lomu. Na tomto rozhraní dochází k totálnímu odrazu. Dále je optický kabel vybaven primární a sekundární ochranou, sloužící proti mechanickému poškození, vniknutí vlhkosti či nežádoucího vnějšího elektromagnetického záření. [4]

Index lomu

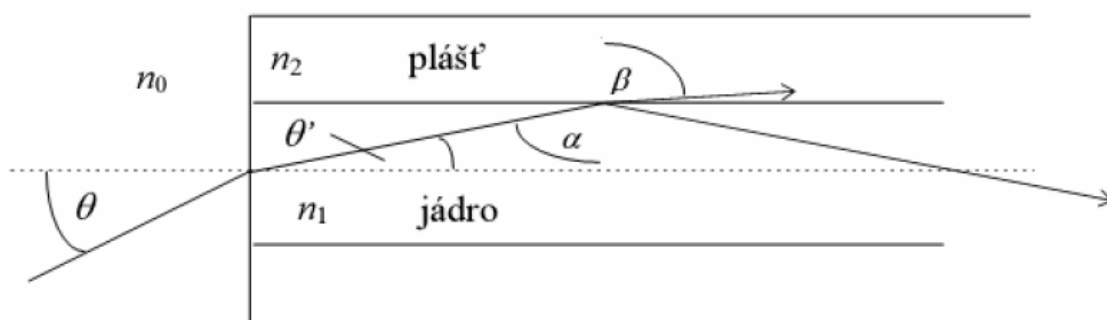
$$n = \frac{c_0}{v} \quad [-] \quad (2.5)$$

kde

n	index lomu [-]
c_0	rychlost světla ve vakuu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v	rychlost světla v prostředí [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

Jedná se tedy o bezrozměrnou veličinu, popisující kolikrát se sníží rychlost světla prostředím oproti rychlosti ve vakuu. Z toho lze odvodit, že index lomu pro vakuum je roven 1, pro ostatní materiály musí být větší než 1. Pro zjednodušení budeme uvažovat index lomu konstantní pro daný typ látky a nezávislý na vlnové délce.

Snellův zákon



Obrázek 2.3: Totální odraz v optickém vlákně [4]

kde

n_0	index lomu vzduchu
n_1	index lomu jádra
n_2	index lomu pláště
θ	úhel dopadu světla na čelo vlákna
θ'	úhel lomu světla v jádře
α	úhel dopadu světla na rozhraní jádro/plášť
β	úhel lomu světla v plášti

Pro rozhraní jádro/plášť tedy platí Snellův zákon takto:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.6)$$

Aby na tomto rozhraní došlo k totálnímu odrazu, musí být úhel α větší než úhel mezní (označme ho jako α_m) dle vztahu (2.7)

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.7)$$

Datové sítě

Jak již bylo předesláno v úvodu této podkapitoly, využití optických vláken v datových sítích je stále rozšířenější. Z pohledu výrobní technologie můžeme rozdělit používaná vlákna v datových sítích na vlákna se skokovou změnou indexu lomu a na vlákna tzv. gradientní. V prvním případě se jedná o vlákno méně náročné na výrobu, kde je jasně oddělen index lomu jádra a obalu. Světelný paprsek se tedy šíří za pomoci totálního odrazu popsaného výše. Tento typ vláken je díky nenáročné výrobě levnější, nevýhodou při použití v multimódovém režimu je však vznik tzv. módové disperze (jev způsobený odlišnou délkou tras jednotlivých módových paprsků, ty na výstupu způsobují rozšíření vstupních pulsů). Druhým typem výrobní technologie jsou vlákna gradientní, kde není jasně dána hranice změny indexů lomů mezi jádrem a obalem. Obě vrstvy skloviny jsou do sebe zapuštěny, světlo se tak nešíří pomocí totálního odrazu, ale na principu ohybu světla. Díky tomu nedochází ve vláknu k módové disperzi, světlo se tak může šířit vyšší rychlostí, čímž je tento typ vhodnější pro přenos dat na větší vzdálenosti. [7]

Oba výše popsané typy vláken mohou pracovat ve dvou režimech, jednovidovém (anglicky singlemod, SM) nebo vícevidovém (multimod, MM). První z uvedených pracovních režimů vede v daný časový okamžik pouze jeden světelný paprsek, eliminuje se tak vliv módové disperze. Nejpoužívanější singlemód vlákna mají průměr jádra 8 μm , rychlost přenosu dat až 26 Tbit/s, mohou využívat obě výše zmíněné technologie. Tento režim se používá pro přenos dat na větší vzdálenosti, např. mezi městy. Na kratší vzdálenosti je vhodnější použít vlákna pracující v režimu multimódu, dnes s nejčastěji používaným průměrem jader 50 μm .

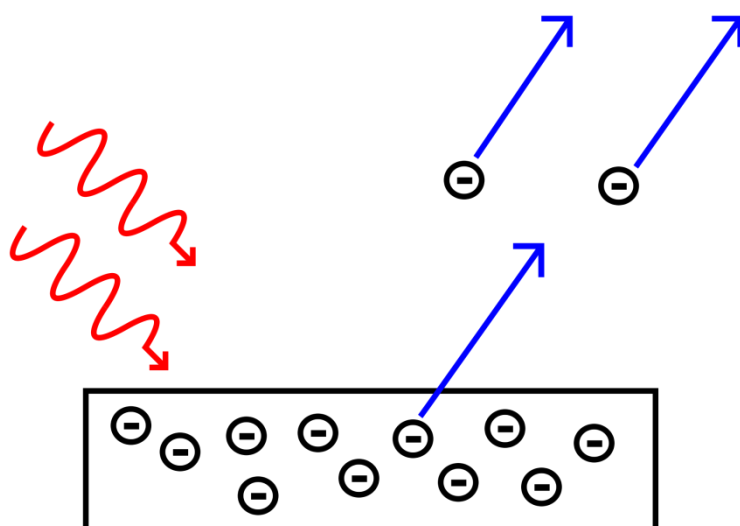
Tento typ je využit pro datový transport na vzdálenost menší než 600m, nejčastěji uvnitř areálu nebo v samotných budovách. Na kratší vzdálenosti je vhodnější aplikovat levnější vlákna se skokovou změnou indexu lomu, na delší naopak gradientní vlákna. Rychlost datového toku se v ideálním případě může pohybovat kolem hodnoty 10 Gbit/s, což je pro sítě typu LAN více než dostačující. [7]

2.3 Fotoelektrický jev

Tento fyzikální jev zaznamenal jako první Heinrich Hertz v roce 1887 při pozorování kovové destičky, na kterou dopadalo elektromagnetické záření. Docházelo k vystupování elektronů z povrchu kovu. Pomocí tehdejších znalostí fyziky světla nebylo možné tento jev matematicky popsat, dopadající světlo se totiž nechovalo jako vlnění. Možnost přesnějšího popisu přišla až počátkem 20. století s rozvojem kvantové teorie. Fotoelektrický jev poprvé zcela vysvětlil Albert Einstein, za což mu byla v roce 1920 udělena Nobelova cena za fyziku. Základem úspěchu bylo vymanit se z konvenčního myšlení a přijmout ideu, že se světlo může chovat i jako částice ve formě fotonu, nikoli pouze jako vlnění.

První experimenty probíhaly při osvětlení kovové destičky bílým světlem. Materiál přitom pohltil pouze ty složky, které měly vyšší frekvenci, složky s nižší frekvencí ve spektru zůstaly. Dále byla pozorována emise elektronů ven z materiálu. Takto emitované elektrony měly vždy stejnou energii odpovídající pohlcenému světlu. V případě zvýšení intenzity světla došlo k větší emisi elektronů, nenastal však nárůst jejich energie. Jako příklad může být uveden zinek, který po osvětlení ultrafialovým zářením mění svoji polaritu ke kladnějším hodnotám (ztrácí záporně nabitě elektrony).

Při osvětlení materiálu elektromagnetickým zářením může dojít ke dvěma situacím, k vnějšímu a vnitřnímu fotoelektrickému jevu. V prvním případě dojde k úplnému uvolnění elektronů, které opustí látku a interagují v jejím okolí. Tyto elektrony bývají označovány jako fotoelektrony. Foton dodá elektronu energii potřebnou k vymanění se z materiálu (W_v), zbytek energie je přeměněn na energii kinetickou (m_e odpovídá hmotnosti elektronu, v rychlosti se kterou opustí materiál), viz vztah 2.8. [1, 2, 3, 5]

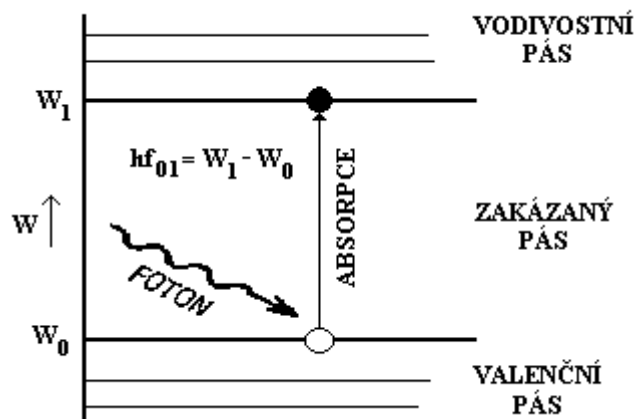


Obrázek 2.4: Vnější fotoelektrický jev

$$hf = W_v + \frac{1}{2}m_e v^2 \quad (2.8)$$

Vnitřní fotoelektrický jev probíhá podobně, jen s tím rozdílem, že nedojde k úplnému uvolnění elektronu z materiálu, pouze k jeho přesunu do vyšší energetické hladiny, kde se ve vodivostním pásmu podílejí na zvýšení vodivosti. Tyto elektrony nazýváme vodivostními.

Pro popis vnitřního fotoelektrického jevu využijeme známý pásový model pro polovodič. Skládá se z valenčních a vodivostních pásem, které jsou od sebe odděleny pásmem zakázaným o šířce několik eV. Elektrony, vyskytující se ve valenčním pásmu, se nepodílí na elektrické vodivosti a pro překonání zakázaného pásma jim musí být dodána energie rovna rozdílu těchto pásem (viz vztah 2.9), v našem případě ve formě dopadajícího fotonu. Ve vodivostním pásmu setrvají pouze krátký čas, 10^{-3} až 10^{-7} sekund, poté se vrátí zpět do stavu nejméně energeticky náročného. Vnitřního fotoelektrického jevu se využívá v celé řadě aplikací od jednoduchých fotodiod a fotorezistorů až po CCD snímače v digitálních fotoaparátech a mobilních telefonech. Tento jev samozřejmě využívají i detektory použité v naší laboratorní úloze. [3]



Obrázek 2.5: Vnitřní fotoelektrický jev [3]

$$hf = W_1 - W_0 \quad (2.9)$$

Jev může nastat také obráceně, kdy je materiál doslova bombardován urychlenými elektrony a po pohlcení části jejich kinetické energie vzniká elektromagnetické záření. Tento jev se označuje jako inverzní fotoelektrický jev a je využit např. k tvorbě rentgenového záření v rentgence. [3]

3 Detektory

Z předešlé kapitoly máme nastíněny základní fyzikální principy spojené se světlem a jeho detekcí. Nejprve budou shrnuty základní vlastnosti a parametry použitých optických detektorů. Dále se zaměříme na popis jednotlivých detektorů, které budou použity při návrhu laboratorní úlohy. Konkrétně se bude jednat o jednoduchou polovodičovou fotodiodu, fotonásobič a lavinovou diodu. Na závěr bude přidán popis LED diody, jako jednoho z možných zdrojů světla. Popis principu fungování součástek bude opět velmi hrubý, pouze pro ujasnění si základních mechanismů.

3.1 Vlastnosti optických detektorů

Všechny optické detektory zmíněné v této kapitole lze charakterizovat za pomoci několika vlastností, a to konkrétně spektrální účinností a charakteristikou, konverzní kvantovou účinností, časovou odezvou a detektivitou. Jelikož všechny popsané detektory pracují na principu fotoelektrického jevu a jedná se o senzory s plošnou detekční částí, nebudeme se v této podkapitole věnovat popisným vlastnostem jiných typů detektorů.

Spektrální citlivost

Integrovaná citlivost K je dána podílem výstupního napětí na senzoru a zářivým tokem na něj dopadajícím. Vztah pro spektrální citlivost je vztažen k vlnové délce zářivého toku.

$$K_{\lambda} = \frac{U}{\phi_{\lambda}} [V \cdot W^{-1}] \quad (3.1)$$

Relativní spektrální citlivost:

Tato veličina popisuje poměr mezi danou spektrální citlivostí a spektrální citlivostí o vlnové délce, na kterou je detektor nejvíce citlivý. Nabývá hodnot v intervalu $\{0,1\}$.

$$S_{\lambda} = \frac{K_{\lambda}}{K_{\lambda_{max}}} [-] \quad (3.2)$$

Spektrální charakteristika

Nejčastěji se jedná o grafické zobrazení závislosti výstupní veličiny detektoru na vlnové délce (resp. frekvenci) detekovaného záření. Pokud senzor vykazuje v požadovaném intervalu vlnových délek konstantní hodnoty výstupních veličin (v případě našich senzorů proud a napětí), mluvíme o senzoru neselektivním. V opačném případě jde o detektor selektivní, jeho odezva je pro každou frekvenci dopadajícího světla jiná.

Kvantová účinnost

Konverzní účinnost obecně vzato popisuje poměr mezi energií do procesu vstupující a energií na jeho výstupu. V případě fotoelektrických detektorů (založených na fotoelektrickém jevu) však hovoříme o kvantové účinnosti, tedy poměru mezi konkrétním počtem fotonů

dopadajících na citlivou vrstvu detektoru a elektronů na výstupu senzoru ve formě měřitelné elektrické energie.

Výkonový ekvivalent (NEP):

Zkratka vychází z anglického Noise Equivalent Power a vyjadřuje hodnotu vstupního zářivého toku, při které je výstupní napětí rovno efektivní hodnotě šumového napětí.

$$NEP = \phi \cdot \frac{\sqrt{U_S^2}}{U} \left[W \cdot Hz^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (3.4)$$

kde $\sqrt{U_S^2}$ efektivní hodnota integrálního šumového napětí a Δf šířka frekvenčního pásma.

Detektivita:

$$D = \frac{1}{NEP} \left[W^{-1} \cdot Hz^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3.5)$$

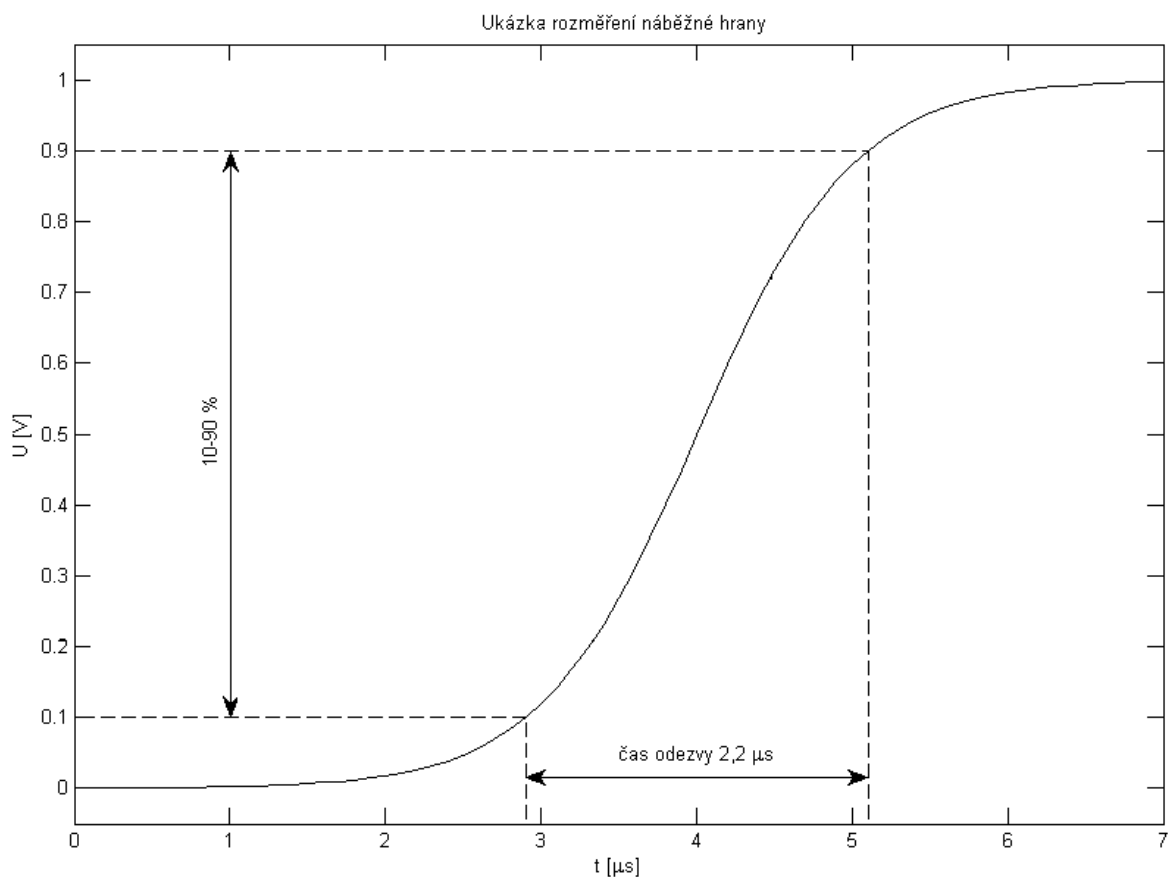
Specifická detektivita:

Toto vyjádření spektrální detektivity závisí i na velikosti plochy detektoru S a určuje mezní rozlišovací schopnost senzoru. Je to vhodný parametr při porovnávání různých typů detektorů. [8,9]

$$D^* = D \cdot \sqrt{S} = \frac{\sqrt{S}}{NEP} \left[W^{-1} \cdot m \cdot Hz^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3.6)$$

Časová odezva:

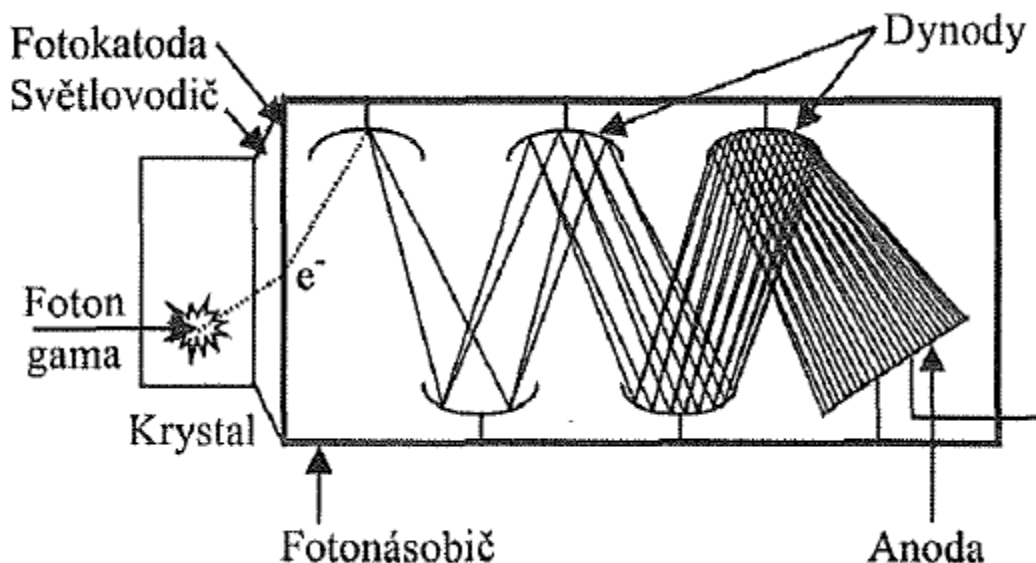
Časová odezva popisuje rychlost reakce detektoru na skokovou změnu intenzity dopadajícího záření na jeho aktivní plochu. Logicky se tedy jedná o dva časy, dobu nárůstu (anglicky risetime, odezva na sepnutí) a dobu poklesu (falltime, vypnutí). Ve starší literatuře se doba nárůstu určuje jako vzestup výstupní hodnoty z nuly na hodnotu $1-1/e$ krát nižší než maximum, a u doby poklesu z maxima na $(1-e)$ násobek výchozí maximální hodnoty. [8] Dnes se však používá systém měření doby nárůstu z 10 na 90% maximální hodnoty, u doby poklesu obráceně. Tento způsob rozměření je ukázán na obrázku 3.1, rozměřena byla ukázková funkce sigmoidy. Většina dnešních digitálních osciloskopů umožňuje automatické rozměření obou časů.



Obrázek 3.1: Ukázka rozměření doby nárůstu (risetime)

3.2 Fotonásobič

Fotonásobič je detektor staršího typu, který nevyužívá polovodičovou technologii. Používá se k detekci velmi malých světelných intenzit, v některých případech i jednotlivých fotonů. Uplatnění nachází zejména v nukleární medicíně jako detektor v gama kamerách (varianta se scintilačním krystalem na obrázku 3.2) a pro regulaci jasu a expozice rentgenových zařízení. Dříve se používal také při fluorescenční mikroskopii, dnes ho však nahradila vyspělejší lavinová fotodioda (více v podkapitole 3.4). Nyní se podíváme na konstrukci a princip fotonásobiče.



Obrázek 3.2: Fotonásobič se scintilačním krystalem [10]

Celý děj probíhá ve skleněném válci, ve kterém je vakuum, podobném elektronce. Foton viditelného světla dopadne na fotokatodu, kde interaguje s jejím materiálem a dojde k uvolnění jednoho elektronu, který se označuje jako primární. Zde se uplatní dříve zmiňovaný vnější fotoelektrický efekt. Volný elektron je poté přitahován nejbližší dynodou, na které je přiloženo vysoké napětí, řádově 100 V. Takto urychlený elektron předá svoji kinetickou energii dvěma (i více) dalším elektronům obsažených v materiálu dynody a vyrazí je ven. Vzniknou tak nové, sekundární elektrony, které jsou opět přitahovány k další dynodě. Tento děj se opakuje pro každou z dynod, kterých může být v některých případech až 12. Napětí na dynodách je ze zdroje přivedeno přes odporový dělič tak, aby napětí rostlo se vzdáleností dynody od fotokatody. Z toho také vyplývá nevýhoda ve formě nutnosti zdroje vysokého napětí, řádově 1000 V. Po vyražení elektronů z poslední dynody putují k anodě, kde se podílí na tvorbě anodového proudu. Ten je díky zesílení na dynodách dostatečně velký k zaznamenání. Pokud bychom uvažovali jeden primární elektron, který by na každé z dynod vyrazil 2 sekundární elektrony, při počtu 10 dynod by na anodu dopadlo 10^2 elektronů. Zesílení je pro tento případ tedy 1000, v případě přiložení vyššího napětí může dojít k zesílení až 2 miliony.

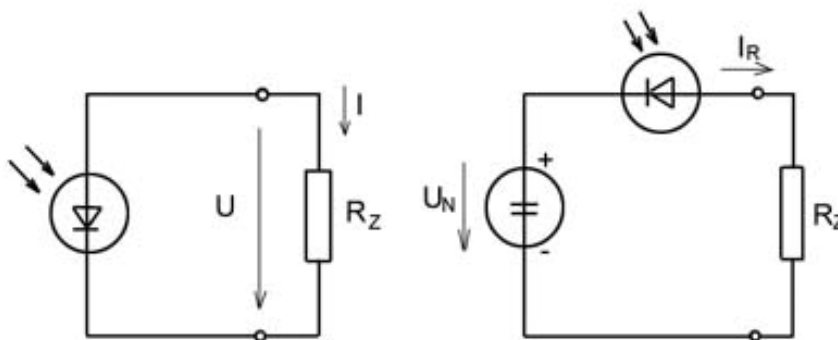
Fotonásobiče mají díky tomuto jevu vysokou citlivost a mohou pracovat s frekvencemi do 100MHz. Nevýhodou může být náročnější výroba díky složité mechanické konstrukci, či potřeba zdroje vysokého napětí. Přesto nebyly fotonásobiče v mnoha aplikacích prozatím nahrazeny polovodičovými součástkami, jako se tomu stalo u většiny ostatních elektronek. [1, 4]

3.3 Fotodioda

Fotodioda je jedním z nejrozšířenějších polovodičových detektorů elektromagnetického záření. Nejjednodušší typy fotodiod jsou vytvořeny pouze z vrstev polovodiče typu N (majoritní nosiče jsou elektrony) a typu P (majoritní jsou kladné díry). Jejich spojením vznikne tzv. PN přechod, rozhraní mezi dvěma typy polovodičů s odlišnými majoritními nosiči náboje. Tento přechod je velmi citlivý na světlo. Vnitřní konstrukce fotodiody je podobná polovodičové usměrňovací diodě. V případě, že se na PN přechod nedostane žádné světlo, mají téměř shodné voltampérové charakteristiky. Pro dopravení elektromagnetického záření do oblasti PN přechodu je pouzdro fotodiody vybaveno propustným okénkem a čočkou, pro zajištění dostatečné fokusace záření do požadované oblasti.

Při dopadu elektromagnetického záření (může se jednat o infračervené, ultrafialové záření nebo viditelné světlo) dojde k vnitřnímu fotoelektrickému jevu. Dopadající foton předá svoji energii elektronu ve valenčním pásmu, ten překoná pásmo zakázané a podílí se na poklesu elektrického odporu, tedy zvýšení vodivosti, svou přítomností ve vodivostním pásmu. Fotodioda může být v elektrickém obvodu zapojena dvěma způsoby, a to v závěrném či propustném směru. Fotodioda zapojená v závěrném směru má katodu připojenou ke kladné svorce zdroje napětí. Při nulovém osvětlení má fotodioda nekonečný odpor (v ideálním stavu), obvodem tedy neprotéká žádný proud. S rostoucím osvětlením tento odpor klesá a fotodiodou začne procházet závěrný proud (I_R). Tento proud je přímo úměrný počtu dopadajících fotonů a roste lineárně. Tento druh zapojení se používá pro měření intenzity osvětlení. Schéma viz níže.

Druhou možností je zapojení v tzv. hradlovém režimu (někdy označovaný jako fotovoltaiický), kdy se fotodioda sama stane zdrojem napětí, které opět roste s množstvím dopadajících fotonů na PN přechod. Tohoto režimu se využívá ve fotovoltaiických panelech na výrobu elektrické energie.



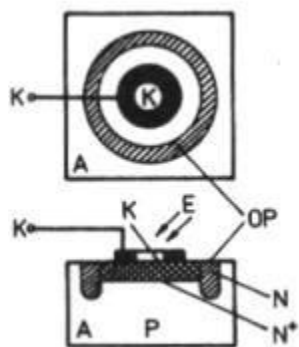
Obrázek 3.3: Fotodioda v obvodu, zleva hradlové, závěrné zapojení [3]

V dnešní době jsou nejvíce rozšířeny fotodiody typu PIN. Okénkem v pouzdře vniká světlo přes propustnou silně dotovanou oblast polovodiče typu P^+ , který je oddělen od polovodiče

typu N silnou vrstvou I. Tato vrstva je dotována jen velmi málo a má vysokou elektrickou pevnost, řádově 100 voltů. Tento typ fotodiody je uzpůsoben pro práci s vysokými elektrickými intenzitami v prostoru přechodů (PI, IN), čímž se oproti klasické fotodiodě značně snižuje čas reakce na dopadající světlo a taktéž dokáže pracovat s vyššími frekvencemi. Další modifikací této technologie je lavinová fotodioda. [1, 3]

3.4 Lavinová fotodioda

Tento polovodičový detektor elektromagnetického záření, někdy označovaný jako lavinová PIN fotodioda, v sobě skloubil princip fotonásobiče s polovodičovou technologií. Lavinová fotodioda pracuje na základě vnitřního fotoelektrického jevu. Elektron vybuzený dopadem fotonu spustí podobně jako u fotonásobiče řetězovou reakci, kdy dojde k jeho urychlení a interakci s materiálem. Elektron předává část své energie do materiálu, resp. jeho elektronu ve valenční vrstvě, a ten se uvolní. Dojde tak ke zdvojnásobení původního počtu elektronů. K urychlení elektronu dojde díky přiloženému vysokému závěrnému napětí. Oproti fotonásobiči odpadá nutnost složité mechanické konstrukce s dynodami, veškeré děje se odehrávají v samotném materiálu lavinové fotodiody.



Obrázek 3.4: Konstrukce lavinové fotodiody [3]

Katoda lavinové fotodiody je tvořena polovodičem typu N, který je nerovnoměrně dotován. Koncentrace příměsí se prudce snižuje směrem do hloubky, ze silně dotovaného typu N^+ až na intrinziční polovodič I. Při přiložení vysokého napětí v závěrném směru dojde k nerovnoměrnému rozložení elektrické intenzity uvnitř N vrstvy, což má za následek urychlení excitovaných elektronů. Ty svou vysokou rychlostí způsobí ionizaci krystalové mřížky materiálu a vyrazení dalšího elektronu. Takto probíhající řetězová reakce má za následek prudké zvýšení anodového proudu. Zvýšením přiloženého napětí můžeme regulovat celkový zisk. Výhodou proti klasické fotodiodě je vysoká citlivost a velmi krátká doba reakce. Oproti fotonásobičům má lavinová fotodioda vyšší kvantovou účinnost, ale nižší zisk. Nevýhodou může být nutnost přiložení vysokého napětí. To má za následek zvýšení tepelného šumu, který může negativně ovlivnit zbytek obvodu. [3]

V dnešní době nahrazují lavinové fotodiody konstrukčně složitější fotonásobiče v aplikacích, kde je zapotřebí měřit nižší intenzity osvětlení, jako příklad uvedeme fluorescenční mikroskopii.

3.5 LED dioda

V naší úloze používáme jako zdroj světla LED diodu, proto by bylo vhodné se o této polovodičové součástce zmínit. LED dioda (zkratka z anglického Light Emitting Diod) je tedy polovodičová součástka s jedním PN přechodem vyrobeným z vhodně zvoleného materiálu. Součástka je připojena ke zdroji napětí v propustním směru (anoda je připojena ke kladné svorce zdroje, katoda k záporné), prochází přes ni proud. To zapříčiní jakési „vstřikování“ elektronů do polovodiče typu P a děr do typu N. Aby se celý systém dostal opět do energeticky nejméně náročného stavu, musí elektrony z vodivostního pásma překonat pásmo zakázané a dostat se do pásma valenčního, kde dojde k rekombinaci s dírami. Při tomto procesu se uvolní jisté množství energie, které je vyzářeno formou světla (fotonů) a tepla. Tato energie (E_g) se stanoví jako rozdíl energetické úrovně vodivostního pásma (E_2) a pásma valenčního (E_1), viz vztah 3.1. Abychom dosáhli emise fotonů o požadované vlnové délce, musíme vybrat vhodný materiál s šířkou zakázaného pásma, dle vztahu 3.8. [2]

$$E_g = E_2 - E_1 \text{ [eV]} \quad (3.7)$$

$$\lambda = \frac{c \cdot h}{E_g} \text{ [nm]} \quad (3.8)$$

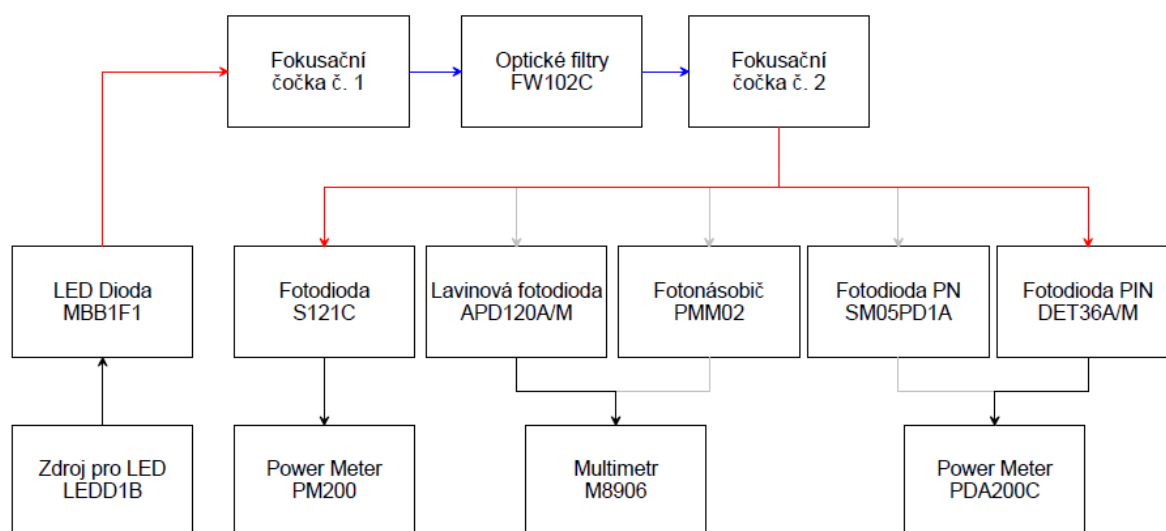
Spektrum světla emitovaného z LED diody však nemá čarový charakter, neobsahuje pouze jednu vlnovou délku. Vypočtená vlnová délka odpovídá maximálnímu zastoupení ve spektru, zbytek emitovaného spektra má Gaussovské rozložení s šířkou píku až 100nm. Účinnost LED diody se díky ztrátám reflexního a absorpčního typu pohybuje pouze okolo 7%. Zbytek je rozptýlen a pohlcen cestou přes pouzdro z transparentní epoxidové pryskyřice.

4 Návrh pracoviště

V následující kapitole bude popsán návrh pracoviště pro měření vlastností optických detektorů a stejnojmenné laboratorní úlohy. Úloha samotná má za úkol objasnit studentům rozdíly ve vlastnostech výše popsaných detektorů elektromagnetického záření a to fotonásobiče, fotodiody a lavinové fotodiody. Veškeré komponenty byly dodány firmou Thorlabs® ve formě přípravků opatřených vhodným vstupním i výstupním rozhraním. Optická vlákna a některé další komponenty použité v optické části úlohy jsou od firmy Ocean Optics®. Tato kapitola tedy objasní základní myšlenku fungování celé soustavy a popíše jednotlivé součásti a jejich vlastnosti.

4.1 Blokové schéma

Jako sledovaná vlastnost pro tuto úlohu byla zvolena spektrální přenosová charakteristika vybraných detektorů. V úvahu ještě připadá měření tepelného šumu a linearity snímače. Druhé blokové schéma s drobnou obměnou bude sloužit pro měření dynamických charakteristik, tedy sledování náběžných a sestupných hran detektorů při sepnutí světelného zdroje. Nyní se zaměříme na měření spektrálních vlastností detektorů pro světlo o několika vybraných vlnových délkách.

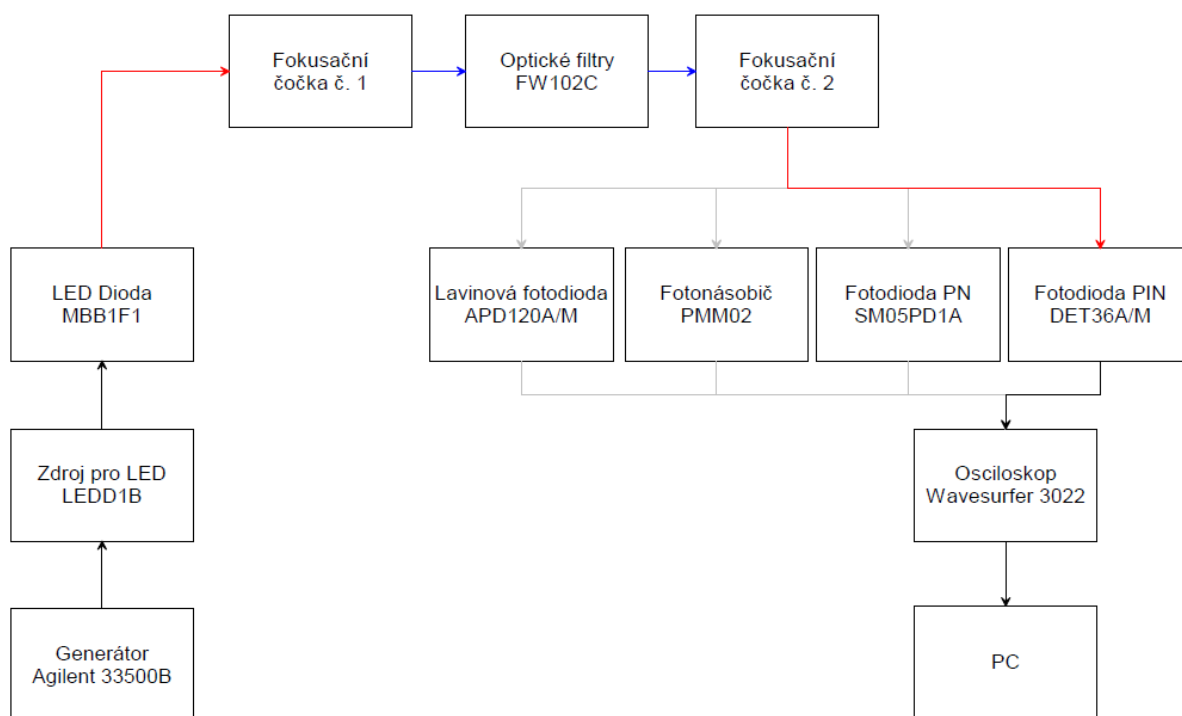


Obrázek 4.1: Blokové schéma pracoviště pro měření spektrálních charakteristik detektorů

Legenda:

- spoj pomocí elektrického vodiče
- optické vlákno
- paprsek procházející vzduchem
- alternativní připojení

Blokové schéma pracoviště (viz obrázek 4.1) lze rozdělit do tří logických částí. První část obsahuje zdroj bílého světla v podobě LED diody s vysokou svítivostí, proud LED diodou je řízen ovladačem LEDD1B. Zdrojová část je spojena s částí optickou skrze optické vlákno, vyznačeno červeně. Následuje průchod světla přes fokusační čočku, optický filtr a druhou čočku zpět do optického vlákna. V této části prochází světlo vzduchem (znázorněno modře), dochází zde k největšímu útlumu. Následuje rozdvojené optické vlákno, polovinu intenzity světla dopraví k referenční části s křemíkovou fotodiodou S151C, druhou k samotným detektorům. Ty budou během měření postupně připojovány do obvodu, alternativní připojení detektorů jsou vyznačeny šedě. Jako referenční měřicí zařízení byl zvolen přístroj PM200 pro měření optického výkonu s dotykovým displejem v kombinaci s již zmiňovanou fotodiodou S151C. Pro sledování elektrického výstupu ve formě anodového proudu z fotodiod typu PN a PIN je použit přístroj PDA200C, který primárně slouží jako fotodiodový zesilovač, v naší aplikaci poslouží pouze jako citlivý nanoampérmetr. Výstup z fotonásobiče a lavinové fotodiody bude sledován multimetrem M8906.



Obrázek 4.2: Blokové schéma pracoviště pro měření dynamických charakteristik

Uspořádání pracoviště pro měření dynamických charakteristik se liší pouze v drobnostech. K proudovému regulátoru LEDD1B pracujícím v režimu MOD (více níže) je připojen generátor obdélníkového signálu Agilent 33500B. Světlo emitované z LED diody je díky tomu modulováno obdélníkovým signálem. Střední část soustavy se nemění, pouze na jejím konci je umístěn digitální osciloskop Wavesurfer 3022 se vzorkovací frekvencí 200 MHz, pro záznam náběžných, sestupných hran a rozměření dob nárůstu a poklesu výstupních signálů.

Tento osciloskop je mimo jiné vybaven sérií USB portů pro transport dat do osobního počítače, kde proběhne výsledné vyhodnocení naměřených dat.

4.2 Zdrojová část

Jako světelný zdroj je v naší úloze použita LED dioda MBB1F1 s vysokým výkonem napájená ze zdroje LEDD1B. Oba komponenty jsou dodány firmou Thorlabs®.

LEDD1B

Jedná se o napájecí a řídicí jednotku navrženou přímo pro aplikace využívající LED diody. Zařízení je napájeno stejnosměrným napětím 12 V a je uloženo v šasi z černého plechu. Jednotka je schopna dodávat proud v rozsahu 0 až 1200 mA o frekvenci 570 kHz. S LED diodou je spojena přes 4 pinový konektor M8 (na obrázku 4.3 označen LED), anoda LED diody je připojena na levý spodní pin, katoda na levý horní. Zbývající dva piny nejsou připojeny. Na zadním panelu je umístěna zdířka pro připojení napájení a BNC konektor pro externí řízení napájecího proudu (MOD IN). Čelní panel je vybaven potenciometrem pro nastavení maximálního proudu, ten lze posunout do požadované polohy pomocí šroubováčku (CURRENT LIMIT). Nastavení obou těchto panelů by nemělo být při běžném užívání měněno.



Obrázek 4.3: Zadní a čelní panel LEDD1B [11]

Horní panel, viz obrázek 4.4, slouží pro jemné nastavení proudu v rozsahu od 0 do limitu nastaveného na čelním panelu. Výrobce bohužel neudává, zda je nárůst proudu lineární či nikoli. To znemožňuje možnost použití tohoto zdroje pro měření linearity detektorů. Dále je horní panel vybaven přepínačem režimu. V našem případě využíváme kontinuálního módu (CW), při kterém je LED diodě dodáván konstantní nepřerušovaný proud. Dále lze použít možnost spouštěvého módu (TRG. V tomto případě je přes konektor BNC připojen externí napěťový obvod se spínačem pracující s TTL logikou. Poslední možností je režim modulovaného napájení (MOD) s připojením externího kmitavého obvodu, tak lze docílit různých opakujících se spouštěcích signálů. Přehled nejdůležitějších vlastností LEDD1B je uveden v tabulce 4.1. [11]



Obrázek 4.4: Horní panel LEDD1B s uživatelským rozhraním [11]

Tabulka 4.1: Nejdůležitější vlastnosti LEDD1B [11]

Vlastnost	Hodnota
Napájení	12 V
Rozsah výstupního proudu	0-1200 mA
Frekvence	570 kHz
Kolísání proudu	8 mA
Napětí pro modulaci	0-5 V
Frekvence modulace	0-5 kHz
TTL H level	min 2 V
TTL L level	max 0,55 V
Náběžná hrana	51 μ s
Sestupná hrana	79 μ s

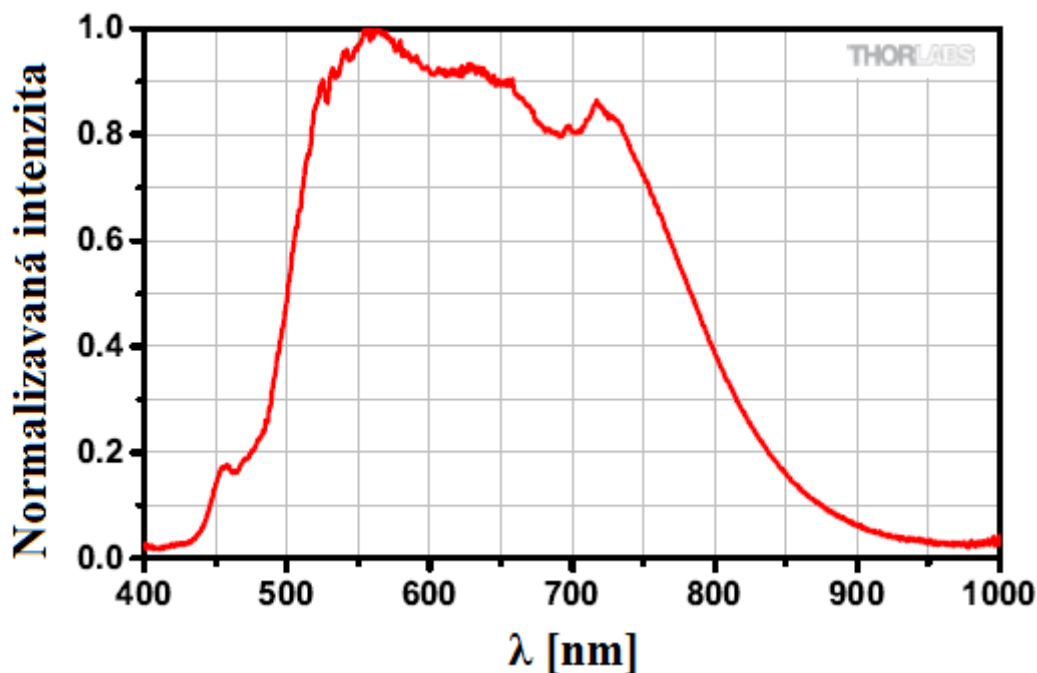
MBB1F1

Jako zdroj světla byla zvolena LED dioda s vysokým výkonem MBB1F1. LED dioda je napájena výše popsáním zdrojem LEDD1B přes 4 pinový konektor M8. Optický výstup je kompatibilní s konektorem SMA, rozhraní je navrženo pro užívání optického vlákna s průměrem 400 μ m a numerickou aperturou 0,39, pracujícím v multimódu (MMF). Použitím jiného optického vlákna může dojít k nežádoucímu útlumu. LED dioda je umístěna v hliníkovém žebrovaném šasi, sloužící jako pasivní chladič. [12]



Obrázek 4.5: LED dioda MBB1F1 v hliníkovém chladiči [12]

LED dioda pracuje v rozsahu vlnových délek 470 až 850 nm. Spektrum vidíme na obrázku 4.6. Typický vyzařovaný výkon se pohybuje kolem 1,2 mW při použití doporučeného optického vlákna. Důležité je dodržet maximální povolený proud 500 mA, na tento fakt musíme brát zřetel při nastavování zdroje LEDD1B, aby nedošlo k nevratnému poškození LED diody. Po sepnutí zdroje se výkon ustálí za 5 až 20 minut.



Obrázek 4.6: Spektrum MBB1F1 [12]

Generátor Agilent 33522B

Pro sledování náběžných a sestupných hran použitých detektorů je zapotřebí modulace řídicího proudu, a tedy i vyzařovaného výkonu LED diodou vhodnou funkcí. Proudový ovladač LEDD1B tuto modulaci umožňuje při práci v režimu MOD, kdy přes konektor BNC připojíme generátor funkcí a posuneme přepínač režimu na horním panelu LEDD1B. Generátor Agilent 33522B od firmy Keysight technologies® pracuje na frekvenci 30 MHz, rozlišení 16 bitů a generovaný signál s amplitudou v rozmezí 1mV až 10V. Generátor je opatřen dvěma kanály s možností nastavení výstupní impedance, dále lze využít datové rozhraní USB, LAN nebo GPIB. Jako výstupní signál lze vybrat ze široké škály funkcí, v nabídce je sinus, obdélníkový a trojúhelníkový signál, pila, jednotlivé impulsy i šumový signál. Taktéž lze nastavit veškeré parametry funkcí, frekvenci, offset, amplitudu, fázi a poměr mezi jednotlivými cykly.

V naší aplikaci bylo zařízení použito pro generaci obdélníkového signálu o amplitudě 5 V s offsetem 2,5 V. Poměr cyklů 50% a frekvence 250 mHz. Toto nastavení zaručí sepnutí napájecího proudu z LEDD1B na maximum po dobu 2 sekund. Po uplynutí této doby se signál vrátí na nulu a do LED diody nebude proudit žádný proud.

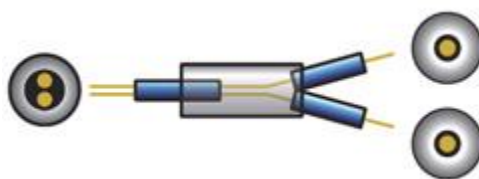
4.3 Optická část

V optickém bloku měřicí soustavy dochází k výběru požadované vlnové délky světla vyzářeného LED diodou MBB1F1. Jednotlivé optické filtry jsou umístěny v revolverovém držáku FW102C. Paprsek světla tedy musí vystoupit z optického vlákna, projít filtrem a opět se do vlákna vrátit. Při této operaci světlo absolvuje krátkou cestu vzduchem, mimo optické vlákno, dochází zde k velkému útlumu. Pro jeho snížení byl do soustavy zařazen pár kolimačních čoček ze série 74 od firmy Ocean Optics®.

Optická vlákna

Pro potřeby laboratorní úlohy byla objednána dvě optická vlákna od firmy Ocean Optics®. První spojuje LED diodu MBB1F1 s kolimační čočkou č. 1, jedná se o vlákno s průměrem 600 μm , o délce 1 metr, pracující v rozsahu vlnových délek 400 až 2100 nm, tedy ve viditelné a infračervené oblasti spektra. Vlákno nese označení výrobce P600-1-VIS-NIR a je opatřeno SMA optickým konektorem. Rozsah vlnových délek tohoto vlákna vyhovuje vlnovým délkám LED diody, průměr jádra však neodpovídá rozměrům ideálního vlákna pro tento zdroj světla udávaných výrobcem, musíme tedy počítat s útlumem. Výrobce také neudává, v jakém módu vlákno pracuje. Vzhledem k tomu, že neplní funkci datového přenosu, předpokládáme, že se jedná o multimód.

V případě druhého vlákna se jedná o vlákno rozdvojené. Vstup je připojen prostřednictvím konektoru SMA na výstup kolimační čočky č. 2, jedna z dvojice výstupních větví je připojena na referenční měřicí zařízení s křemíkovou fotodiodou S121C. Druhá větev je přivedena k jednotlivým detektorům. Vlákno nese označení BIF-400-UV-VIS, má délku 2 metry, průměr jádra je 400 μm a rozsah vlnových délek 300 až 1100 nm (viditelná a ultrafialová část spektra). Konstrukce rozdělení vlákna je schematicky naznačena na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7: Rozdvojení vlákna BIF-400-UV-VIS

Držák filtrů FW102C

Revolverový držák filtrů FW102C od firmy Thorlabs® pojme šest optických filtrů o průměru 25,4 mm. Je vybaven řadou rozhraní pro externí ovládání, napájen je 12 V. Na horní straně je umístěn jednoduchý display ukazující aktuálně používaný filtr. V šasi jsou vytvořeny dva otvory A, B, uživatel si tak bude moci vybrat, v jaké výšce budou používané filtry umístěny, dle konkrétní aplikace. Pohyb kazety s filtry je poháněn servomotorkem, ten lze ovládat buď manuálně, pomocí tlačítek se šipkami, nebo prostřednictvím některého

z rozhraní. Konektor BNC umožňuje použití externí spouště, která využívá TTL logiku, dále zařízení disponuje standardní sériovou linkou RS232 nebo rozhraním USB 2.0 mini. Do vnitřní paměti je možné nahrát jednoduchý ovládací program v jazyce C++ nebo LabVIEW. Pro naši aplikaci jsme zvolili prosté manuální ovládání pomocí tlačítek, pozice filtrů jsou uvedeny v tabulce 4.2.



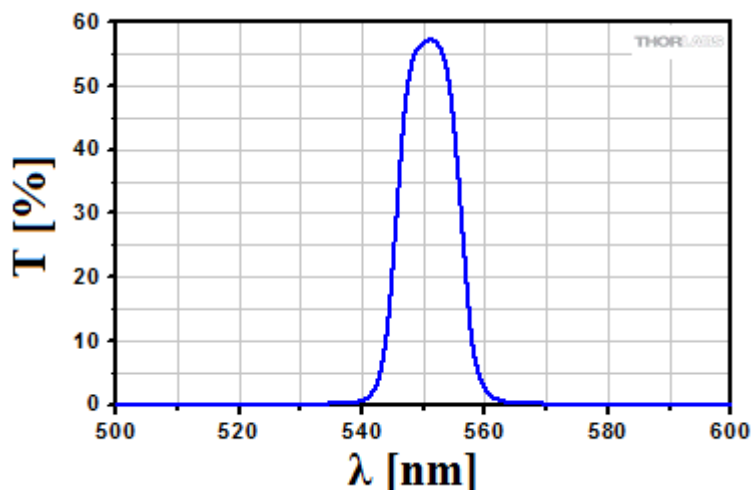
Obrázek 4.8: Držák filtrů FW102C [13]

Optické filtry

Pro výběr konkrétní vlnové délky světla byla pořízena sada šesti filtrů v rozsahu vlnových délek 450 až 700 nm. Filtry mají v píku toleranci ± 2 nm, šířka pásma přenosu v polovině je 10 ± 2 nm. Jedná se o filtry s nejlepšími možnými vlastnostmi, které firma Thorlabs® dodává. Průměr filtrů je 1 palec, tedy 2,54 cm. Umístění filtrů v revolverovém držáku FW102C a další vlastnosti jsou shrnuty v tabulce 4.2. Na obrázku 4.9 vidíme ukázkou graf závislosti transmise na vlnové délce pro filtr FB500-10.

Tabulka 4.2: Umístění optických filtrů v revolverovém držáku FW102C

Č. filtru	λ	Rozsah nepropustnosti	$T_{\min}$	T_p
[-]	[nm]	[nm]	[%]	[%]
1	700	200-1200	50	65
2	650	200-1200	50	55
3	600	200-1200	50	54
4	550	200-1200	50	57
5	500	200-1200	50	50
6	450	200-3000	45	50



Obrázek 4.9: Graf závislosti transmise na vlnové délce pro filtr FB500-10 [13]

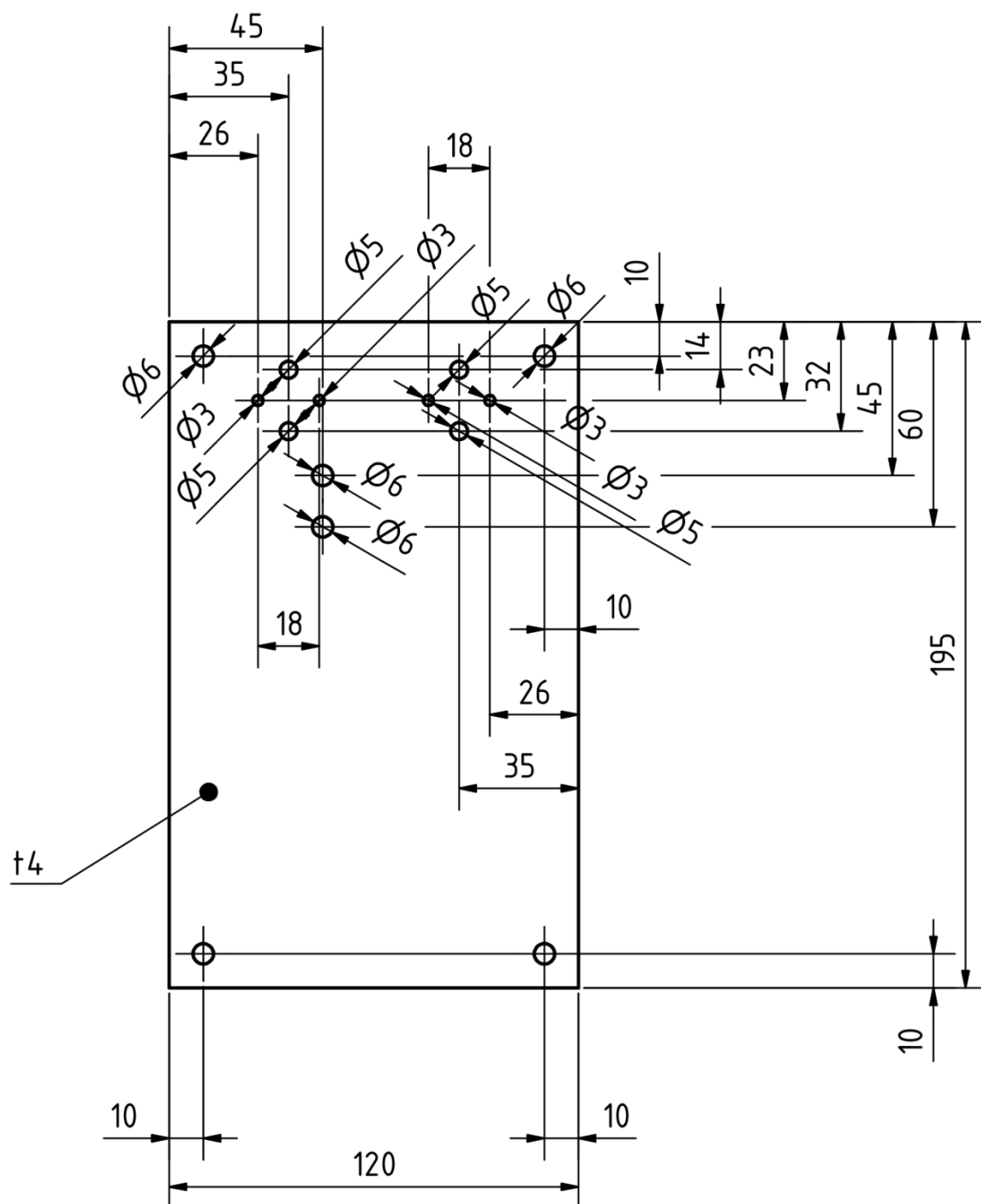
Pomocný aparát

Pro snížení rozptylu a útlumu světla při průchodu optickou částí jsme použili dvojici kolimačních čoček od firmy Ocean Optics®. Jedná se o čočky ze série 74 o průměru 5 mm a ohniskovou vzdáleností 10 mm, jsou navrženy pro práci s vlnovými délkami v rozsahu 200 až 2000 nm, což je pro naši aplikaci více než dostačující. Čočky jsou vybaveny závitem pro připojení optického vlákna skrze konektor SMA. Pro mechanické uchycení mají na přední části vyřezán závit M6, přes ten jsou uchyceny k držáku ze stejné série. Držák i čočka viz obrázek níže. Vzdálenosti optické vlákno-čočka a čočka-filtr byly nastaveny experimentálně, aby byl dosažen co největší zisk.



Obrázek 4.10: Čočka a držák ze série 74 od firmy Ocean Optics®

Díky jinému výrobcí držáku čoček a držáku filtrů FW102C došlo k nekompatibilitě těchto dvou komponent. Modrá část držáku čoček v sobě nemá vytvořeny žádné otvory pro případné uchycení k pracovní desce za pomoci šroubů. Z toho důvodu byl navržen a vyroben pomocný spojovací prvek, výkres viz obrázek 4.11.



Obrázek 4.11: Technický výkres spojovací desky pro držák filtrů a čoček

Deska je vyrobena z hliníkového plechu o síle 4 mm. V rozích desky jsou vyvrtány otvory o průměru 6 mm pro uchycovací šrouby M6 s roztečí 100 a 185 mm, kompatibilní s pracovní deskou od firmy Thorlabs®. Ze spodu lze k desce uchytnit za pomoci vytvořených otvorů držák filtrů dvěma šrouby M6. Držáky čoček jsou vybaveny závity pro nemetrické šrouby, uchycení k desce opět ze spodu přes 2x2 otvory o průměru 5 mm. Dvě dvojice otvorů o průměru 3 mm slouží pro zapuštění čepů na držáku čoček, ty zaručují kolmost obou stojanů na sebe. Rozteč

mezi oběma čočkami byla stanovena na 25 mm, s ohledem na minimalizaci ztrát výkonu při průchodu paprsku optickou soustavou. Mezi spojovací a pracovní desku byly přidány podložky M6, celkem 5 kusů na každý šroub. Byl tak vytvořen prostor pro hlavy šroubů držící komponenty na horní části desky o výšce 6 mm. Celá deska byla ve finále přelakována černým matným sprejem a orážena zkratkou ÚBMI v pravém dolním rohu. Technický výkres v plném rozlišení opatřený razítkem je přiložen v příloze. Fotografie finálního osazení desky a její umístění na pracovišti viz obrázky 5.21, 5.22.

4.4 Detekční část

K jednotlivým detektorům je přivedena vyfiltrovaná část světla prostřednictvím rozděleného optického vlákna BIF-400-UV-VIS. Jedna větev vede světlo k referenční části s optickým wattmetrem PM200 se senzorem S151C, druhá větev je připojena k jednotlivým detektorům. Během měření se bude tento světlovodný kabel přepojovat mezi právě sledovanými detektory. Ty jsou opatřeny redukcemi pro připojení optického vlákna přes konektor SMA.

S151C + PM200

Jako referenční přístroj byl vybrán měřič optického výkonu PM200 v kombinaci se senzorem S151C. Jedná se o křemíkovou fotodiodu pracující v rozsahu vlnových délek 400 až 1100 nm určenou pro měření optického výkonu do 20 mW s rozlišovací schopností 100 pW. Součástí senzoru jsou také obvody pro předzpracování a digitalizaci naměřených dat, ve vnitřní paměti jsou uloženy charakteristiky spektrální citlivosti fotodiody. Senzor komunikuje s okolím přes konektor DB9 s možností připojení k celé řadě měřicích konzolí řady PM od firmy Thorlabs®. Připojení optického vlákna s konektorem SMA lze provést přes redukci PM20-SMA. Přehled nejdůležitějších vlastností senzoru viz tabulka 4.3, graf spektrální citlivosti senzoru viz [14].

Tabulka 4.3: Nejdůležitější vlastnosti S151C [14]

Vlastnost	Hodnota
Rozsah vlnových délek	400-1100 nm
Pracovní rozsah	1 nW-20 mW
Maximální výkonová hustota	10 W/cm ²
Rozlišení	100 pW
Průměr detektoru	5 mm

Hlava optického senzoru S151C je tedy připojena k měřicímu zařízení PM200 přes konektor DB9. Jedná se o zařízení pro měření optického výkonu a energie využívající senzory z řady C. Zařízení je vybaveno moderním dotykovým displejem a řadou vstupně výstupních portů. Po připojení optického senzoru k zařízení dojde k nahrání charakteristiky spektrální citlivosti z vnitřní paměti senzoru a následné kalibraci zařízení. V základní obrazovce (viz

obrázek 4.12) lze vybrat s jakou vlnovou délkou světla pracujeme, frekvenci a útlum přicházejícího signálu. Naměřená data mohou být uložena do paměti zařízení a následně zpracována uvnitř nebo vně na osobním počítači. K exportu dat lze využít rozhraní USB pro připojení flash disku nebo USB mini pro připojení zařízení přímo k počítači. Měřič je taktéž vybaven analogovým výstupem, pomocným portem pro připojení vlastního obvodu a senzorem pro měření okolního osvětlení. Celé zařízení je napájeno stejnosměrným napětím 5V a díky integrované baterii může pracovat i bez připojení do sítě. Díky intuitivnímu ovládání je práce se zařízením velmi snadná. [14, 15].



Obrázek 4.12: Senzor S151C (vlevo) a optický wattmetr PM200 [14, 15].

SM05PD1A, DET36A/M

V obou případech se jedná o jednoduchou křemíkovou fotodiodu zkonstruovanou pro měření kontinuálních i pulzních zdrojů světla. Fotodioda SM05PD1A využívá PN přechod, světlo je k detektoru přivedeno optickým kabelem přes redukci PM20-SMA, výstup v podobně anodového proudu je realizován přes konektor SMA pro koaxiální kabel, samotné měření proběhne na nanoampérmetru PDA200C. Fotodioda pracuje v rozmezí vlnových délek 350 až 1100 nm s píkem v 980 nm. Bez připojení fotodiody k vnějšímu obvodu pracuje v hradlovém režimu bez nutnosti napájení. Nepříjemnou věcí na tomto senzoru je nepřítomnost standardního otvoru pro šroub M4 v šasi pro uchycení. Fotodioda je opatřena pouze závitem 1/2". Na ten byla umístěna redukce s vnějším závitem 1", následuje redukce LMR1/M disponující požadovaným závitem M4.

Senzor DET36A/M je taktéž křemíková fotodioda typu PIN, napájena 9 V z bateriového zdroje, pracuje tedy v závěrném režimu. Světlovodný kabel je k senzoru připevněn přes redukci SM1SMA, výstup je realizován konektorem BNC pro připojení koaxiálního kabelu. Fotodioda pracuje ve stejném rozsahu vlnových délek jako SM05PD1A, tedy 350 až 1100 nm, s píkem v 970 nm. Senzor i s napájením a pomocnými obvody je uložen v hliníkovém šasi s možností fixace přípravku přes tři otvory se závitem M4. Tabulka 4.4 porovnává nejdůležitější vlastnosti obou detektorů.

Tabulka 4.4: Srovnání nejdůležitějších vlastností SM05PD1A a DET36A/M [16, 17]

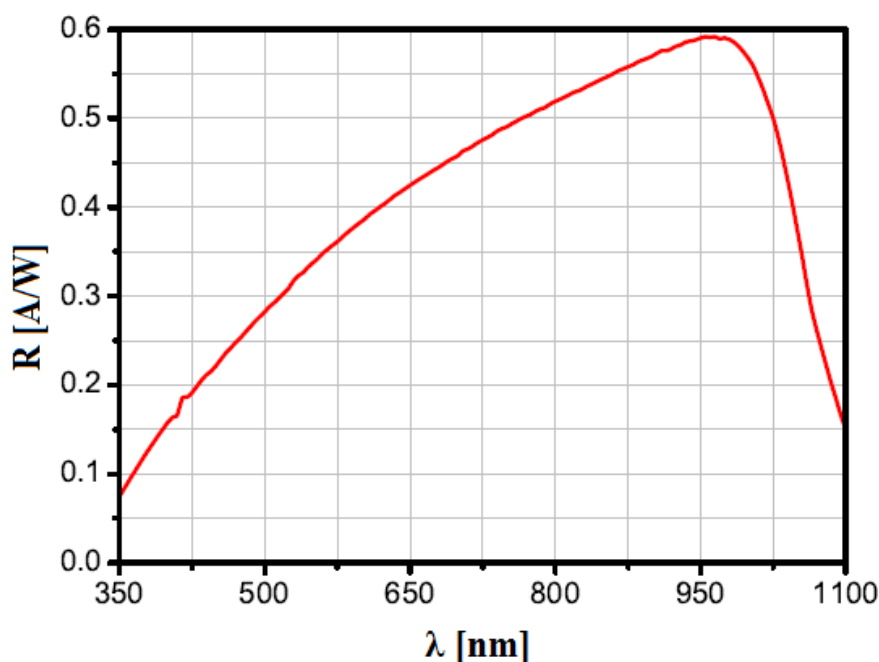
Vlastnost	Hodnota	
Detektor	SM05PD1A	DET36A/M
Druh přechodu	PN	PIN
Rozsah vlnových délek	350-1100 nm	
Pík	980 nm	970 nm
Náběžná hrana	10 ns	14 ns
Proud za temna	0,3 nA	0,35 nA
Aktivní plocha	13 mm ²	



Obrázek 4.13: Fotodiody SM05PD1A (vlevo) a DET36A/M [16, 17]

Pro přepočet mezi výstupním anodovým proudem fotodiody a výkonem vstupního osvětlení je použit vzorec 4.1, navržený výrobcem. Optický výkon je tedy funkcí proudu, ve jmenovateli je hodnota zisku mezi vstupem a výstupem závislého na vlnové délce. Hodnoty lze odečíst z grafu spektrální citlivosti, viz [16, 17], vztah i křivka je pro oba sensory totožná.

$$P = \frac{I}{\Re(\lambda)} [\text{W}] \quad (4.1)$$



Obrázek 4.13: Graf závislosti přenosu na vlnové délce pro SM05PD1A a DET36A/M [16, 17]

APD120A/M

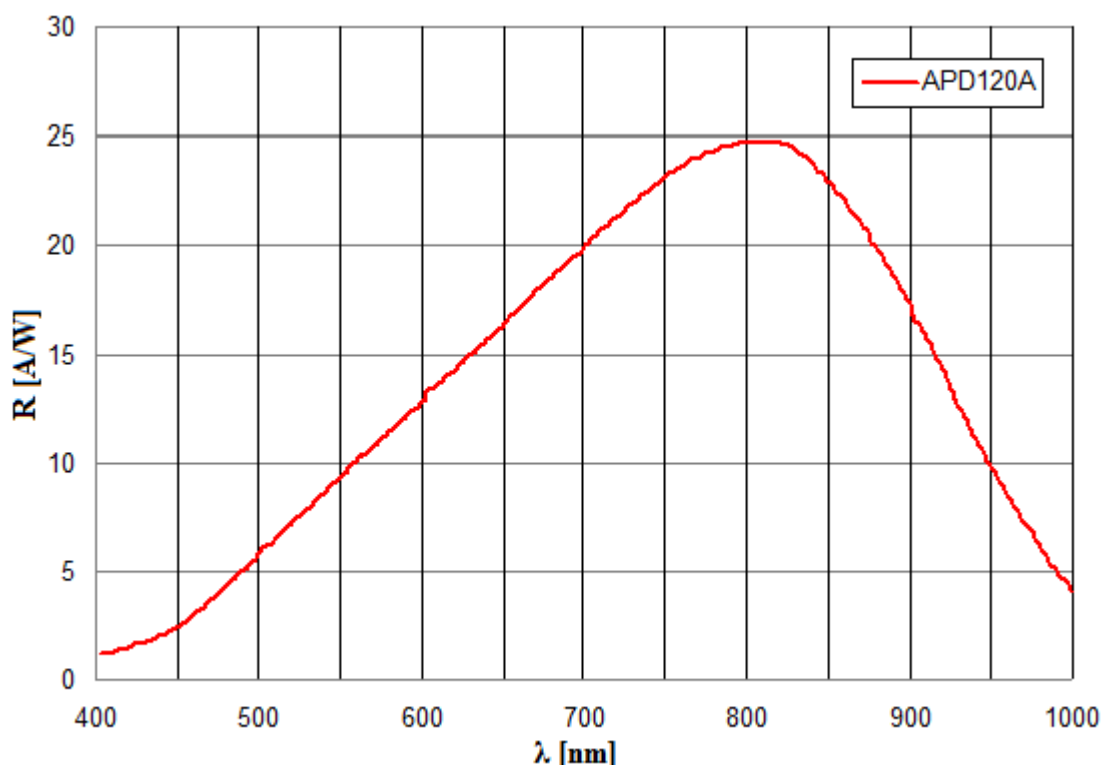
Lavinová fotodioda APD120A/M v sobě kombinuje vysoce citlivý křemíkový senzor a zesilovač s ultra nízkým šumem. To ji činí ideální pro detekci krátkých záblesků světla o nízké intenzitě. Uplatnění tak najde ve spektroskopii a fluorescenční mikroskopii, kde může díky své vysoké senzitivitě nahradit fotonásobiče. Senzor je napájen stejnosměrným napětím o hodnotě pouhých 12 V přes konektor PICO M8, odpadá tak nutnost použití externího vysokonapěťového zdroje. Další výhodou oproti fotonásobiči je skutečnost, že lavinová fotodioda nemůže být poškozena okolním světlem, tento fakt je z uživatelského hlediska velkou výhodou. [18]

APD120A/M pracuje v rozsahu vlnových délek 400 až 1000 nm s píkem v 800 nm. Pro naši aplikaci tento rozsah bohatě vystačí. Saturace senzoru nastává při 1,5 μW , nevratné poškození při 1 mW, je tedy velice nepravděpodobné, že by při běžné manipulaci mohlo okolní světlo senzor jakkoli poškodit. Výstupem je napětí jako funkce optického výkonu detekovaného světla, multiplikačního faktoru (ten je továrně nastaven na 50 při teplotě 23 °C), transimpedančního zisku a přenosu pro konkrétní vlnovou délku dle vztahu 4.2. Napětí je měřeno pomocí multimetru M8906. Nejdůležitější vlastnosti jsou opět shrnuty v tabulce níže. Důležité je upozornit na aktivní plochu lavinové fotodiody ve srovnání s fotodiodami SM05PD1A a DET36A/M. Průměr aktivní plochy u lavinové diody je pouhý 1 mm, tj. 0,785 mm², což je ve srovnání s plochami ostatními výše popsanými detektory (13 mm²) nesrovnatelný rozdíl. Musíme tedy očekávat, že ne všechno světlo dopravené optickým vláknem bude zachyceno na aktivní ploše APD120A/M a přeměněno na výstupní napětí.

$$P = \frac{U}{\Re(\lambda) \cdot M \cdot G} [\mu W] \quad (4.2)$$

Tabulka 4.5: Nejdůležitější vlastnosti APD120A/M [18]

Vlastnost	Hodnota
Rozsah vlnových délek	400-1000 nm
Pík	980 nm
Saturace	1,5 μW
Trvalé poškození	1 mW
Aktivní plocha	0,785 mm ²



Obrázek 4.14: Graf závislosti přenosu na vlnové délce pro APD120A/M [18]

PMM02

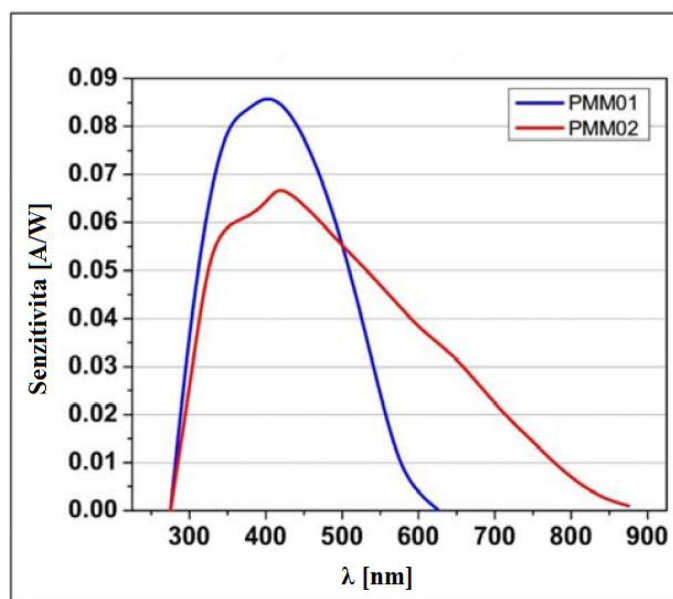
PMM02 je fotonásobič s cirkulárním uspořádáním dynod pro detekci světelného signálu o frekvenci 0 až 20 kHz v rozsahu vlnových délek 280 až 630 nm. Fotonásobič je napájen 12 V z externího zdroje napětí, uvnitř je obsažen transimpedantní zesilovač zajišťující napětí až -1250 V. Napětí ve fotonásobiči, a tím i výsledný zisk, lze řídit externím zdrojem napětí, který nebyl obsažen v dodaném balení. Tato regulace operuje s hodnotami 0 až 1,25 V. Maximální zisk fotonásobiče je $3,1 \times 10^6$. Fotokatoda je vyrobena z polopropustného multialkalického kovu typu S20 o průměru 22 mm, tj. 380 mm². Takto velká plocha fotokatody zajišťuje zachycení veškerých fotonů vystupujících z optického vlákna. Výstupní napětí lze připojit k měřicímu zařízení přes konektor SMA pomocí koaxiálního kabelu. V rámci měření diplomové práce byl použit jako zdroj regulačního napětí generátor Agilent 33522B. Důležité parametry fotonásobiče jsou shrnuty v tabulce 4.6. [19]

Tabulka 4.6: Nejdůležitější vlastnosti PMM02 [19]

Vlastnost	Hodnota
Rozsah vlnových délek	280-850 nm
Maximální zisk	$3,1 \times 10^6$
Náběžná a sestupná hrana	15 μ s
Doba zahřátí	<10 s
Proud za temna	0,5-5 nA
Plocha detektoru	380 mm ²

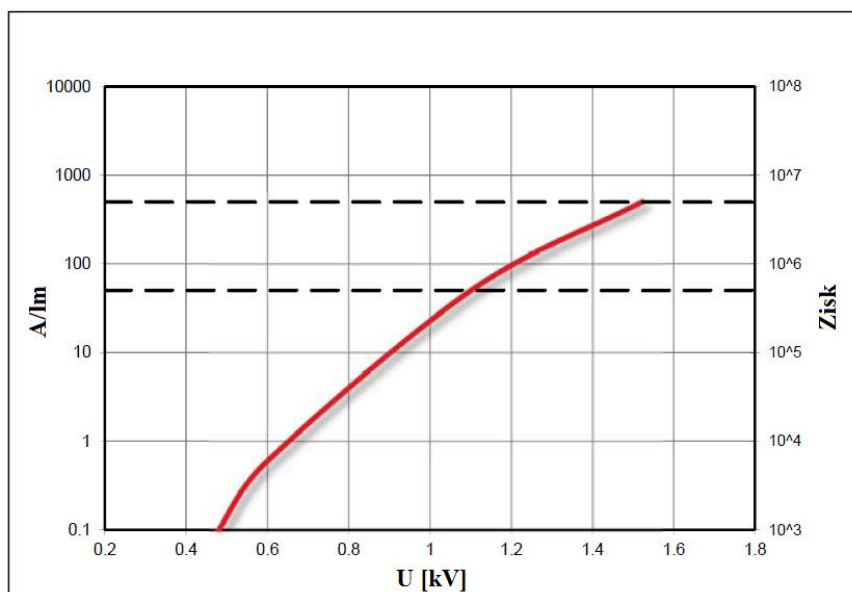
Přepočtní vzorec mezi vstupním optickým výkonem a výstupním napětí je uveden níže, vztah 4.3, kde U je výstupní napětí, TG transimpedanční zisk (v našem případě 10^6 V/A), S je senzitivita závislá na vlnové délce (odečteme z grafu na obrázku 4.15, červená křivka pro model PMM02) a G je celkový zisk fotonásobiče. Tuto hodnotu lze odečíst z obrázku 4.16, na němž je znázorněna závislost zisku na přiloženém napětí mezi fotokatodou a anodou. Napětí na fotonásobiči lze vypočítat z napětí řídicího, dle vztahu 4.4.

$$P = \frac{U}{TG \cdot S(\lambda) \cdot G} \text{ [}\mu\text{V]} \quad (4.3)$$



Obrázek 4.15: Graf závislosti senzitivity na vlnové délce pro PMM02 [19]

$$U = -1000 \cdot U_{\text{řídící}} \text{ [V]} \quad (4.4)$$



Obrázek 4.16: Graf závislosti zisku na napětí pro PMM02 [19]

Osciloskop Wavesurfer 3022

Pro záznam náběžných, sestupných hran a rozměření času nárůstu a poklesu byl použit digitální osciloskop Wavesurfer 3022 od firmy Teledyn LeCroy®. Tento dvoukanálový osciloskop pracuje na frekvenci 200 MHz a vzorkuje 4GS/s, což umožňuje detailní rozměření pozorovaného signálu, i rychlých časových změn. Díky barevnému dotykovému displeji o úhlopříčce 10,1“ je práce s osciloskopem velice přehledná. Po dokoupení vhodného modulu může sloužit i jako generátor signálu, disponuje 4x portem USB, 1x port USB mini pro připojení tiskárny, možnost připojení externí spouště, výstup prostřednictvím AUX či připojení do sítě LAN přes konektor RJ45. Kromě uložení naměřených průběhů a zobrazení základních informací o sledovaném signálu lze provést přímo v osciloskopu rozměření nejrůznějších charakteristik, jako náběžná a sestupná hrana, offset, plocha pod křivkou a jiné. Přístroj má celou řadu funkcí, které je v tom textu zbytečné popisovat. V naší aplikaci bude osciloskop Wavesurfer 3022 sloužit pouze pro záznam náběžných a sestupných hran výstupního napětí z jednotlivých detektorů a změření jejich časů.

5 Ověření funkčnosti

V této kapitole se budeme zabývat ověřením funkčnosti navržené měřicí soustavy. Bude proměřen útlum jednotlivých optických vláken i celé soustavy pro bílé světlo i jednotlivé vlnové délky. Dále bude proměřena časová stabilita, spektrální charakteristika zdroje, a vybrané vlastnosti optických detektorů. V závěru bude provedena diskuse dosažených výsledků, potvrzení či vyvrácení funkčnosti měřicí soustavy a návrh protokolu pro laboratorní úlohu do předmětu Mikroskopická zobrazovací technika.

5.1 Zdroj a optická vlákna

Nyní si nastíníme metodiku měření časové stability světelného zdroje, jeho frekvenční charakteristiku, útlum optických vláken a celé soustavy. Jako referenční zařízení byl vybrán senzor S151C v kombinaci s měřičem optického výkonu a energie PM200. Hodnoty naměřené tímto měřicím zařízením by neměly být zatíženy chybou při odečtu ziskových charakteristik z grafu jako je tomu u ostatních senzorů. Budeme tedy tyto hodnoty považovat za správné a referenční.

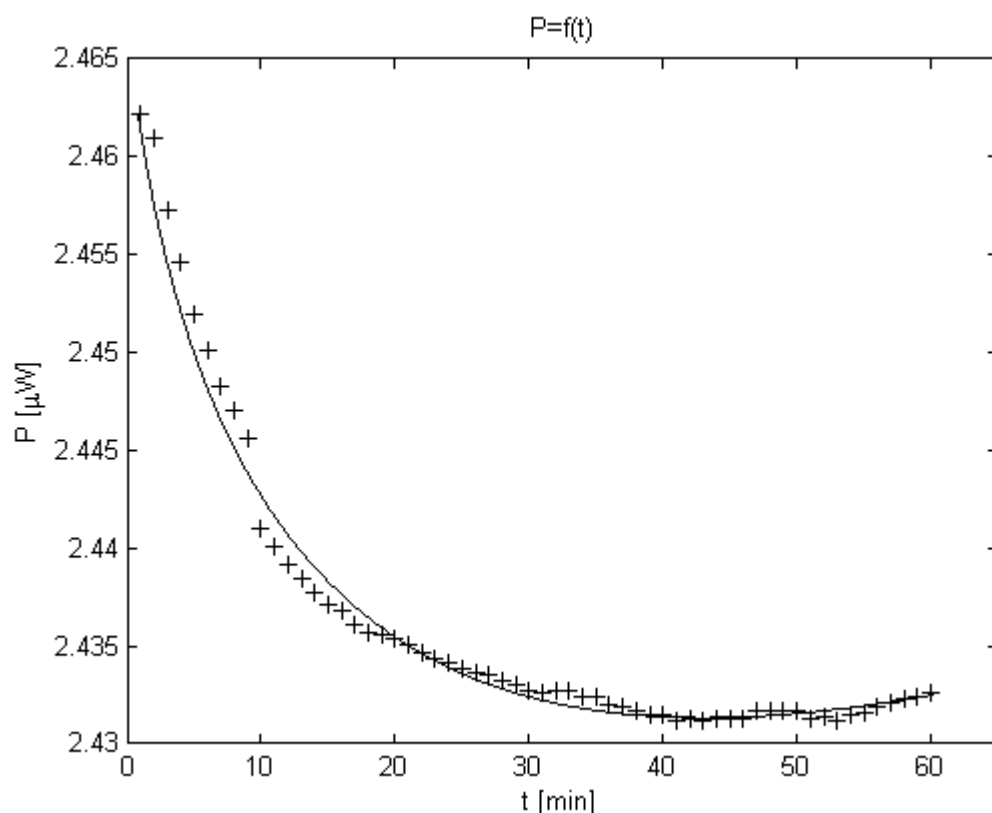
Stabilita zdroje

Proud LED diodou MBB1F1 byl nastaven prostřednictvím LEDD1B na výrobcem doporučenou maximální hodnotu 500 mA. Poté byla LED dioda připojena ke křemíkovému senzoru S151C přes optické vlákno. V průběhu jedné hodiny byl zaznamenán optický výkon v rozmezí jedné minuty. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1, výsledná závislost na obrázku 5.1.

Výrobce udává čas pro ustálení výkonu LED diody v rozmezí 5 až 20 minut dle použitého optického vlákna. V našem případě došlo k ustálení někde mezi 20 až 25 minutami od zapnutí zdroje. Drobný nárůst hodnot výkonu od 53. minuty může být způsoben změnou zakřivení optického vlákna při manipulaci s měřicím zařízením. Můžeme tedy říct, že se zdroj chová korektně s ohledem na hodnoty uvedené výrobcem.

Tabulka 5.1: Naměřené hodnoty pro závislost optického výkonu LED diody MBB1F1 na čase

t	P	t	P	t	P	t	P
[min]	[mW]	[min]	[mW]	[min]	[mW]	[min]	[mW]
1	2,4622	16	2,4368	31	2,4326	46	2,4313
2	2,4610	17	2,4361	32	2,4327	47	2,4317
3	2,4573	18	2,4357	33	2,4327	48	2,4317
4	2,4546	19	2,4356	34	2,4324	49	2,4317
5	2,4520	20	2,4354	35	2,4324	50	2,4317
6	2,4501	21	2,4351	36	2,4320	51	2,4313
7	2,4483	22	2,4347	37	2,4319	52	2,4314
8	2,4470	23	2,4344	38	2,4317	53	2,4312
9	2,4456	24	2,4341	39	2,4315	54	2,4315
10	2,4410	25	2,4338	40	2,4315	55	2,4316
11	2,4401	26	2,4336	41	2,4312	56	2,4319
12	2,4392	27	2,4335	42	2,4313	57	2,4321
13	2,4384	28	2,4332	43	2,4312	58	2,4323
14	2,4377	29	2,4330	44	2,4313	59	2,4324
15	2,4371	30	2,4327	45	2,4313	60	2,4326



Obrázek 5.1: Graf závislosti optického výkonu LED diody MBB1F1 na čase

Útlum optických vláken

Po měření stability zdroje bylo započato měření útlumu optických vláken, nepředpokládáme tedy s výrazným kolísáním hodnoty optického výkonu v průběhu měření.

Nejdříve byl změřen optický výkon „napřímo“ bez použití jakéhokoli vlákna, tyto hodnoty budeme považovat za referenční (označeny indexem REF). V případě použití vlákna doporučeného výrobcem by měl být útlum minimální a hodnota výkonu vystupujícího z vlákna by se měla přibližně shodná s naměřenou hodnotou bez použití vlákna. Měření bylo provedeno pro čtyři hodnoty vyzařovaného výkonu. Ty byly nastavovány pomocí ovladače LEDD1B, který bohužel neudává aktuální nastavenou hodnotu proudu dodávaného LED diodě. Z toho důvodu byly hodnoty výkonu zvoleny jako $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ a maximum na ovládacím prvku LEDD1B.

Pro potřeby úlohy byla pořízena tři vlákna, z toho dvě jednoduchá a jedno rozdvojené. Vláknem s označením P600-1-VIS-NIR pracuje v rozmezí 400-2100 nm, průměr jádra 600 μm (hodnoty na něm změřené budou označeny indexem M). Druhé jednoduché SAF-400-SMA-SMA-0,5 (index O) má průměr jádra 400 μm , ostatní parametry nebyly zjištěny. Rozdvojené vlákno BIF400-UV-VIS (index S1, S2) má průměr 400 μm a rozsah 300-1100 nm. Spektrum vyzařované LED diodou svým rozsahem 470-850 nm spadá do rozsahů všech optických vláken. Průměr vlákna doporučený výrobcem pro připojení na MBB1F1 je 400 μm . Naměřené hodnoty jsou shrnuty v tabulce 5.2.

Tabulka 5.2: Naměřené hodnoty pro útlum optických vláken

Pozice	P_{REF}	P_{O}	P_{M}	P_{S1}	P_{S2}
[-]	[mW]	[mW]	[mW]	[mW]	[mW]
$\frac{1}{4}$	0,17	0,064	0,122	0,037	0,050
$\frac{1}{2}$	0,47	0,182	0,332	0,102	0,134
$\frac{3}{4}$	2,21	0,858	1,542	0,479	0,618
maximum	3,50	1,360	2,466	0,763	1,020

Z tabulky 5.2 lze vyvodit hned několik závěrů. Na vláknech O dochází k většímu útlumu výkonu i přes shodný průměr jádra s doporučením výrobce. Tuto skutečnost nelze nijak logicky odvodit, pokud neznáme přesné parametry tohoto vlákna. Po porovnání hodnot vlákna O a M bylo shledáno jako vhodnější vlákno M, má nižší útlum. Toto vlákno je tedy vhodnější pro přenos světla ze zdroje k optickým filtrům. Velkou neznámou je však chování rozdvojeného vlákna. Přenos by měl být v obou větvích stejný, přesto je zde rozdíl v průměru $\frac{1}{3}$. Jednou z možností by bylo zavést korekci pro jedno z vláken, to by však nebylo příliš edukativní a pro studenty měřící úlohu matoucí. Toto vlákno tedy není vhodné pro měření a bude nahrazeno vláknem O. Rozdvojené vlákno BIF400-UV-VIS bylo odesláno na reklamaci, pro účely měření se tedy budeme muset spokojit s nutností častějšího přepojování vlákna SAF-400-SMA-SMA-0,5.

Útlum optické soustavy

Důležité je také proměřit chování optické soustavy jako celku. Dle teoretického předpokladu bude docházet k největšímu útlumu při průchodu světla vzduchem a optickým

filtrem. K celkovému útlumu se také připočítá průchod oběma světlovodnými kabely. Tabulka 5.3 ukazuje naměřené hodnoty výstupního výkonu po průchodu světla bez filtru i s šesti filtry pro vlnové délky 450-700 nm. Výsledný útlum A byl spočítán dle vztahu 5.1, kde P je výkon naměřený na výstupu, jako vstup (P_{REF}) byl zvolen výkon změřený přímo na LED diodě. $P_{REF} = 3,5 \text{ mW}$.

$$A = 10 \cdot \log\left(\frac{P}{P_{REF}}\right) [\text{dB}] \quad (5.1)$$

Tabulka 5.3: Naměření a vypočtené hodnoty pro měření útlumu optické soustavy

Č. filtru	λ	P	A
[-]	[nm]	[μW]	[dB]
bez filtru	470-850	140,040	-13,9782
1	700	2,220	-31,9772
2	650	1,203	-34,6387
3	600	1,150	-34,8345
4	550	1,212	-34,6071
5	500	0,553	-38,0158
6	450	0,082	-46,3025

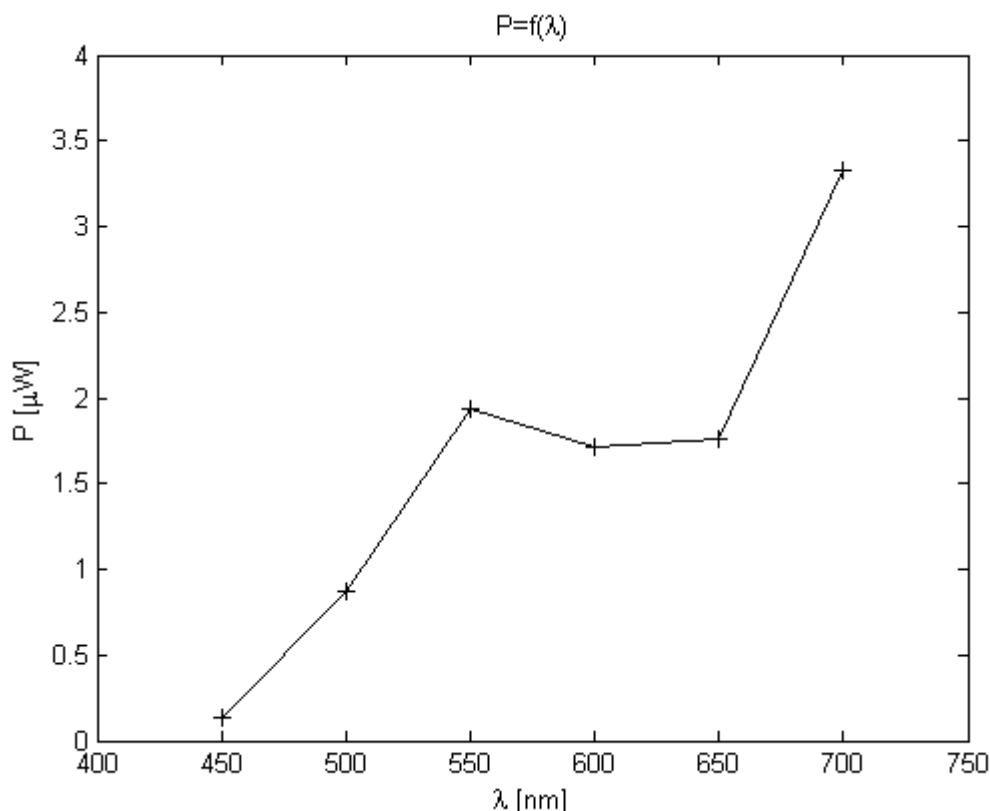
Z tabulky 5.3 můžeme odečíst výsledný útlum pro jednotlivé vlnové délky filtrů. Útlum je poměrně vysoký, pokles mezi vstupní a výstupní hodnotou optického výkonu je o 3 až 4 řády. Tyto výsledky však nejsou na závadu. Díky velmi nízké hodnotě výkonu, kdy dojde u lavinové fotodiody k saturaci, jsou takto velké útlumy spíše užitečné.

Frekvenční charakteristika zdroje

Pro ověření správnosti frekvenční charakteristiky zdrojové LED diody MBB1F1 udávané výrobcem (obrázek 4.6) bylo provedeno její proměření za pomoci referenčního optického wattmetru PM200 se senzorem S151C. Světelný paprsek vycházející ze zdroje prošel celou optickou soustavou, proběhla filtrace požadované frekvence a samotný záznam. Kvůli kapacitě revolverového zásobníku na filtry nemůže být frekvenční charakteristika proměřena nikterak důkladně, natož spojitě, je vybráno pouze 6 vlnových délek. Hodnoty naměřeného optického výkonu jsou shrnuty v tabulce 5.4 graf frekvenční charakteristiky na obrázku 5.2.

Tabulka 5.4: Naměřené optické výkony pro jednotlivé vlnové délky

č. filtru	λ	P
[-]	[nm]	[μW]
1	700	3,324
2	650	1,763
3	600	1,708
4	550	1,939
5	500	0,866
6	450	0,132



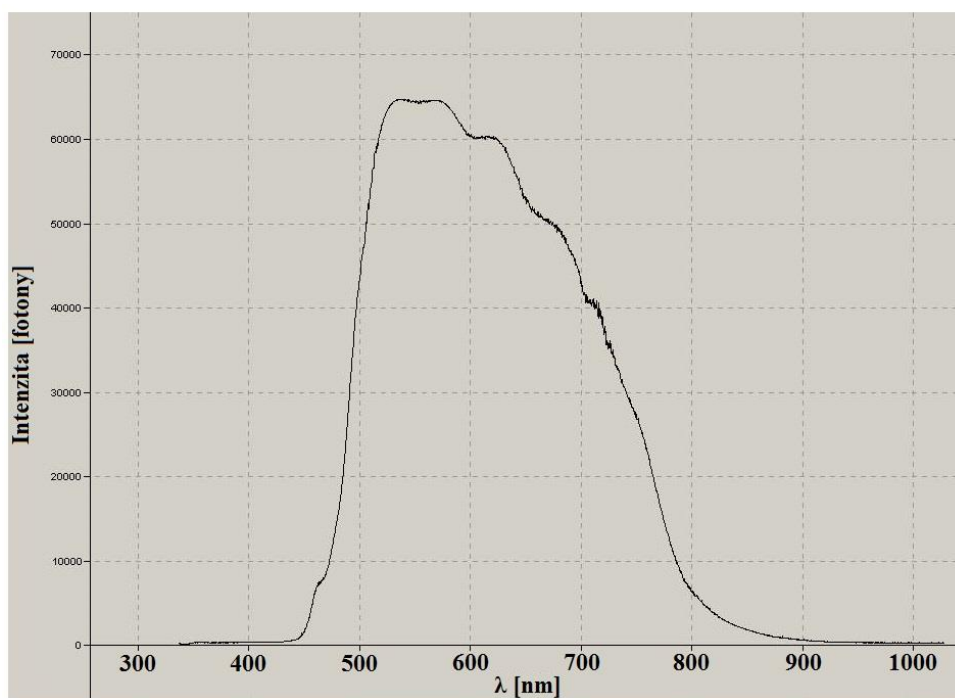
Obrázek 5.2: Graf naměřené frekvenční charakteristiky LED diody MBB1F, proud 500 mA

Pouhým pohledovým porovnáním obrázků 4.6 a 5.2 vidíme, že reálné naměřené hodnoty neodpovídají údajům udávaným výrobcem LED diody. Prvních pět hodnot tvarově odpovídá, poslední hodnota výkonu pro filtr o vlnové délce 700 nm však dvojnásobně převyšuje očekávanou hodnotu. Stejně výsledky byly dosaženy i při měření s ostatními detektory (viz dále), chybu měřicího zařízení tedy můžeme vyloučit. Dalším možným zdrojem chyby může být použité optické vlákno SAF-400-SMA-SMA-0,5, jeho přesné přenosové charakteristiky výrobce neudává. Proto bylo totožné měření provedeno s dalšími dvěma vlákny, P600-1-VIS-NIR pracujícím v rozsahu vlnových délek 400-2100 nm a P600-1-SR s rozsahem 200-1100 nm. Chyba tedy nemohla vzniknout díky vadě optického vlákna.

V úvahu byly taktéž vzaty transmisní faktory jednotlivých filtrů, viz tabulka 4.2. Filtr FB700-10 má transmisní faktor v píku 65%, u ostatních filtrů se pohybuje kolem hodnoty 55%. Na základě tohoto poznatku byla provedena sada výpočtů s cílem odhalit zdroj chyby, naměřené hodnoty byly nejprve poděleny transmisním faktorem, vyzkoušena byla i druhá mocnina. Stejně operace byly provedeny i s normalizovanou hodnotou transmisního faktoru, to však nevedlo k žádnému rozumnému výsledku. Pokud porovnáme výšku píku transmise filtru FB700-10 s ostatními je patrný rozdíl. Avšak srovnáme-li plochu pod křivkou těchto grafů, velké rozdíly nejsou mezi jednotlivými filtry tak vysoké, v žádném případě pro dvojnásobný nárůst očekávané hodnoty jako je tomu u filtru pro 700 nm. Jako zdroj chyby tedy můžeme vyřadit i samotné filtry.

Poslední možností bylo proměření frekvenční charakteristiky zdroje za pomoci spektrofotometru. K tomuto účelu byl využit přístroj USB2000+ od firmy Ocean Optics®. Tento spektrofotometr je určen pro měření velmi nízkých intenzit světelných záblesků na úrovni fotonů, standardně se využívá ve fluorescenční spektrometrii. Proto byla intenzita vyzařovaného světla z LEDD1B stažena až na pouhých 200 nW. Na obrázku 5.3 můžeme vidět naměřené spektrum, které se nijak zásadně neliší od spektra udávaného výrobcem LED diody. Na hodnotě 550 nm je přenos největší, na vlnové délce 700 nm o něco nižší než u 650 nm, hodnota rozhodně není dvojnásobná. Spektrofotometrem byla změřena frekvence a amplituda světla prošlého filtrem. Filtr pro 700 nm opět nevykazoval žádné anomálie.

Nestandardní chování LED diody LEDD1B tedy zůstává neobjasněno. Jelikož spektrofotometr USB2000+ pracuje s nízkými intenzitami světla, bylo by vhodné spektrum proměřit na zařízení s vyšší saturační hladinou. Měření charakteristiky bylo prováděno s intenzitami vyššími, řádově v jednotkách μW . I přes tento záhadný jev bude světelný zdroj v naší úloze použit, na vlastnosti všech zkoumaných detektorů bude mít stejný vliv.



Obrázek 5.3: Spektrum LED diody MBB1F změřené pomocí spektrofotometru USB2000+

5.2 Statické vlastnosti

Po ověření funkčnosti měřicí soustavy, provedení nutných úprav a stanovení referenčních hodnot jsme přistoupili k měření na samotných detektorech. V této kapitole se budeme věnovat měření statických charakteristik všech čtyř optických detektorů. Nejdříve ověříme jejich funkčnost porovnáním naměřených dat z referenčního měřicího přístroje, dále proměříme přenosové charakteristiky, u kterých bude sledována závislost na vlnové délce. U

senzorů bude taktéž změřen proud za temna a porovnán s hodnotou udávanou výrobcem. V následujících částech pro jednotlivé typy měření budou vždy uvedeny výsledky pro všechny detektory v následujícím pořadí: SM05PD1A, DET36A/M, APD120A/M a PMM02. V tabulce 5.5 jsou uvedeny hodnoty responsivity a senzitivity S pro všechny detektory, tyto hodnoty budou použity při výpočtu vstupního optického výkonu dopadajícího na aktivní plochu senzorů.

Tabulka 5.5: Hodnoty responsivity a senzitivity pro jednotlivé detektory

		Typ detektoru			
		SM05PD1A	DET36A/M	APD120A/M	PMM02
č. filtru	λ	$\mathfrak{R}$	$\mathfrak{R}$	$\mathfrak{R}$	S
[-]	[nm]	[A/W]	[A/W]	[A/W]	[A/W]
1	700	0,455	0,455	19,5	0,023
2	650	0,430	0,430	17,5	0,032
3	600	0,390	0,390	13,0	0,038
4	550	0,340	0,340	9,0	0,048
5	500	0,285	0,285	6,0	0,056
6	450	0,225	0,225	2,5	0,065

5.2.1 Ověření funkčnosti detektorů

SM05PD1A

Optické vlákno bylo přivedeno k fotodiodě SM05PD1A přes redukci PM20-SMA, výstupní anodový proud byl přiveden koaxiálním kabelem k nanoampérmetru PDA200C. Proud fotodiodou MBB1F1 byl nastaven na 500 mA. Hodnota výsledného optického výkonu byla přepočtena dle vztahu 4.1. Hodnota $\mathfrak{R}$ (v originále označená jako responsivity) je odečtena z grafu na obrázku 4.13 a je funkcí vlnové délky. Dále byla vypočtena relativní a absolutní chyba měření dle vztahu 5.2, 5.3.

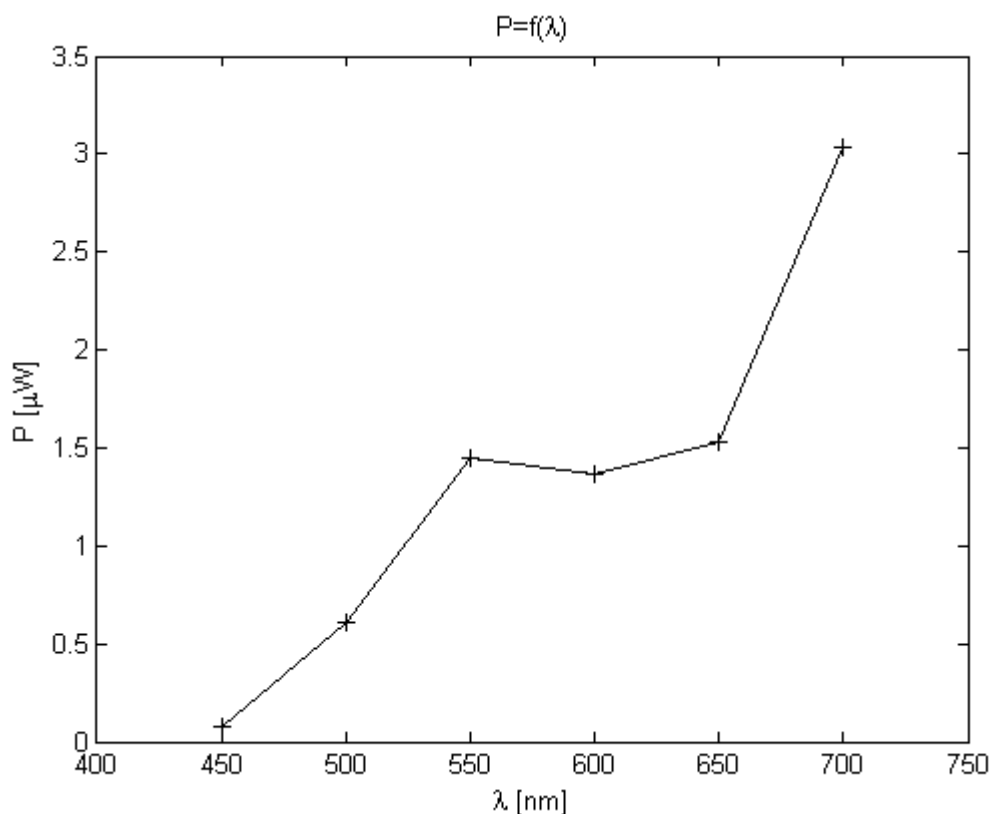
$$\Delta = |P_{REF} - P| [\mu W] \quad (5.2)$$

$$\delta = \frac{\Delta}{P_{REF}} \cdot 100 [\%] \quad (5.3)$$

Tabulka 5.6: Naměřené a vypočtené hodnoty pro závislost přenosu na vlnové délce pro SM05PD1A

č. filtru	λ	I	$\mathfrak{R}$	P	P_{REF}	Δ	δ
[-]	[nm]	[μA]	[A/W]	[μW]	[μW]	[μW]	[%]
1	700	1,383	0,455	3,040	3,324	0,2844	8,5571
2	650	0,656	0,430	1,526	1,763	0,2374	13,4667
3	600	0,531	0,390	1,362	1,708	0,3465	20,2846
4	550	0,492	0,340	1,447	1,939	0,4919	25,3709
5	500	0,172	0,285	0,604	0,866	0,2625	30,3108
6	450	0,018	0,225	0,080	0,132	0,0520	39,3939

V tabulce 5.6 vidíme vypočtenou hodnotu optického výkonu přijatého fotodiodou a její porovnání s referenční hodnotou pomocí vypočtené relativní a absolutní chyby. Odchyłka od referenčních hodnot je způsobena dvěma faktory. První příčinou je nepřesný odečet hodnoty $\mathfrak{R}$ z grafu funkce, grafické odčítání není nikterak přesné. Pro přesnější hodnoty by byla vhodná tabulka se souřadnicemi příslušné funkce. Druhé chyby se dopouštíme při měření díky nutnosti přepojení optického vlákna mezi jednotlivými detektory. Vláknó se tak dostane do jiné pozice, je ohnuto v jiném rádiusu a dochází k jinému lomu paprsku světla uvnitř světlovodu. Relativní chyba dle teoretického předpokladu roste směrem k nižším hodnotám optického výkonu. V případě srovnání hodnot výkonu pro světlo o vlnové délce 700 nm můžeme být s výsledkem spokojeni. Pro zřetelnější ověření funkčnosti senzoru byl vytvořen graf závislosti optického výkonu na vlnové délce, viz obrázek 5.3. Výsledný graf se tvarově shoduje s grafem frekvenční charakteristiky LED diody MBB1F1 naměřené referenčním zařízením PM200 s detektorem S151C.



Obrázek 5.4: Graf závislosti naměřeného optického výkonu na vlnové délce, použitý senzor: fotodióda SM05PD1A

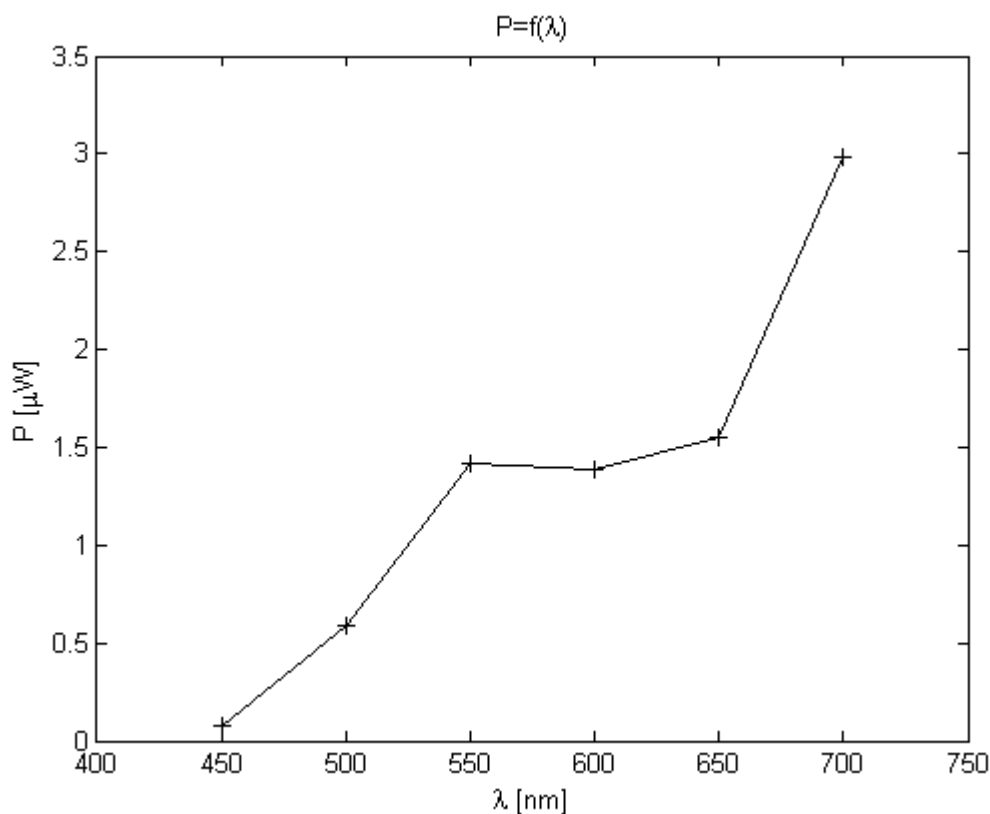
Dále byl u senzoru měřen proud za temna. Jeho hodnoty jsou však velmi malé, v řádech 100 pA, na přesnou detekci tedy nemáme dostatečné vybavení. Naměřený proud za temna je roven 0,01 nA, udávaný výrobcem 0,3 nA. Z výše provedených měření vyplývá, že fotodióda SM05PD1A pracuje správně.

DET36A/M

Měření s touto fotodiodou proběhlo naprosto shodně jako u fotodiody předcházející. Platí pro ni stejné vzorce i graf, proto uvedeme pouze výsledky měření. Naměřený proud za temna je roven 0,09 nA, uváděný výrobcem 0,35 nA. Výsledky měření lze interpretovat stejně jako u SM05PD1A. Správná funkčnost DET36A/M potvrzena.

Tabulka 5.7: Naměřené a vypočtené hodnoty pro závislost přenosu na vlnové délce pro DET36A/M

č. filtru	λ	I	$\mathfrak{R}$	P	P_{REF}	Δ	δ
[-]	[nm]	[μ A]	[A/W]	[μ W]	[μ W]	[μ W]	[%]
1	700	1,374	0,46	2,987	3,324	0,3370	10,1397
2	650	0,651	0,42	1,550	1,763	0,2130	12,0817
3	600	0,526	0,38	1,384	1,708	0,3238	18,9572
4	550	0,483	0,34	1,421	1,939	0,5184	26,7360
5	500	0,166	0,28	0,593	0,866	0,2731	31,5407
6	450	0,017	0,22	0,077	0,132	0,0547	41,4601



Obrázek 5.5: Graf závislosti naměřeného optického výkonu na vlnové délce, použitý senzor: fotodioda DET36A/M

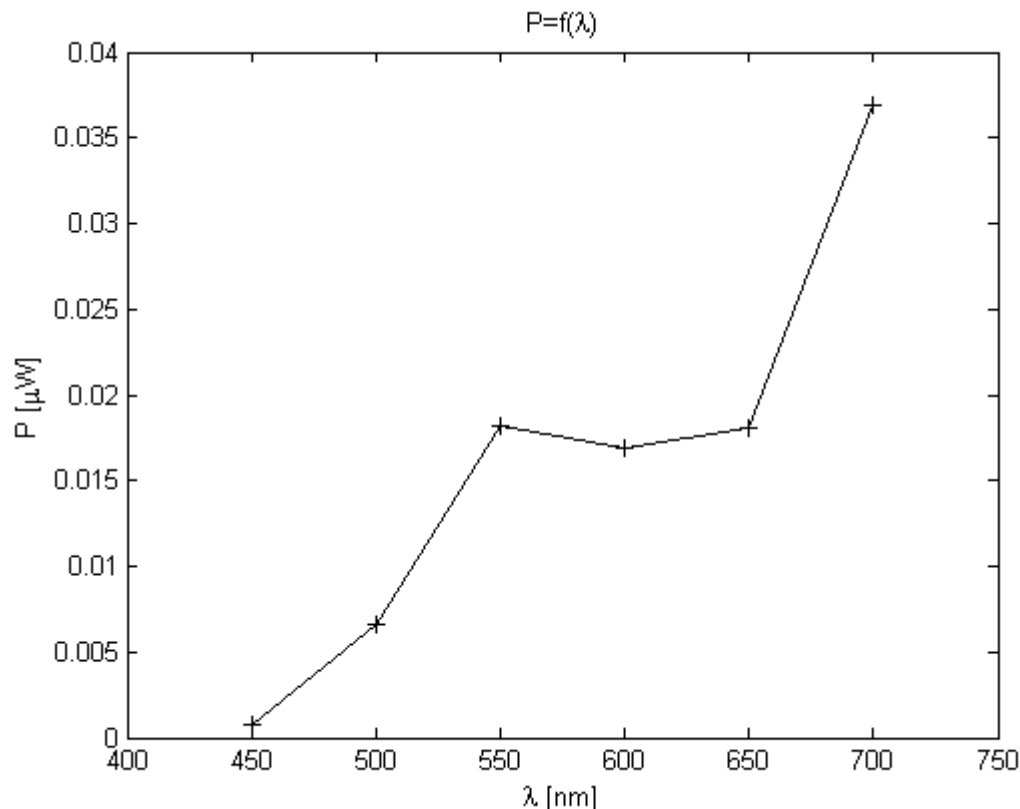
APD120A/M

Lavinová fotodioda APD120A/M byla zapojena do měřícího obvodu obdobně jako předcházející detektory. Výstup ve formě stejnosměrného napětí bylo měřeno multimetrem

M890G na koaxiálním kabelu. Dalším rozdílem bylo nastavení proudu zdrojovou fotodiodou MBB1F1. Při dopadu světla o příliš velkém výkonu na fotodiodu (max. $1,5 \mu\text{W}$) dochází k saturaci, kdy již nestoupá výstupní napětí. To stagnuje kolem hodnoty 3,6 V. Proto bylo nutné snížit intenzitu vyzařování LED diody. K tomu opět posloužil referenční optický wattmetr PM200, byl nastaven takový proud LED diodou, aby výsledný výkon dal hodnotu $1,5 \mu\text{W}$. Hodnota vstupního optického výkonu byla spočtena dle vztahu 4.2, hodnota multiplikačního faktoru M je výrobcem nastavena na 50 při okolní teplotě 23°C , transimpedanční zisk je roven hodnotě 100 kV/A. Hodnoty responsivity pro jednotlivé vlnové délky byla odečtena z grafu na obrázku 4.14.

Tabulka 5.8: Naměřené a vypočtené hodnoty závislosti přenosu na vlnové délce pro APM120A/M

č. filtru	λ	U	$\mathfrak{R}$	P
[-]	[nm]	[V]	[A/W]	[μW]
1	700	3,6000	19,5	0,036923
2	650	1,5850	17,5	0,018114
3	600	1,1010	13,0	0,016938
4	550	0,8190	9,0	0,018200
5	500	0,1997	6,0	0,006657
6	450	0,0095	2,5	0,000760



Obrázek 5.6: Graf závislosti naměřeného optického výkonu na vlnové délce, použitý senzor: lavinová fotodioda APD120A/M

Z grafu závislosti naměřeného optického výkonu na vlnové délce (obrázek 5.6) vidíme, že lavinová fotodioda APD120A/M přenáší výkon správně. Tvarově se křivka shoduje s výsledky měření s referenčním přístrojem. Naměřené hodnoty však neodpovídají hodnotám referenčním, v případě měření výkonu světla o vlnové délce 700 nm byl referenčním wattmetrem změřen výkon 1,5 μW . Změřený výkon lavinovou fotodiodou je zhruba 40x nižší. Tuto skutečnost může osvětlit srovnání aktivních ploch lavinové fotodiody a křemíkové fotodiody S151C. Referenční senzor S151C má aktivní plochu o velikosti 12,96 mm², APD120A/M pouhých 0,785 mm², tedy zhruba 16x menší. Z toho vyplývá, že ne všechno světlo dopravené světlovodným kabelem k aktivní ploše lavinové fotodiody je využito k transformaci na výstupní napětí. Taktéž lze z výsledků vyvodit, že výstupní hodnota lavinové fotodiody není lineárně závislá na velikosti aktivní plochy. V tomto případě s rostoucí aktivní plochou narůstá výstupní veličina 2,5x.

PMM02

Díky nastavitelnému zisku prostřednictvím regulace řídicího napětí bylo měření s fotonásobičem PMM02 o něco složitější než u předešlých detektorů. Ze základního principu fotonásobiče vyplývá, že se jedná o senzor vhodný pro zesílení krátkých světelných záblesků o velmi nízké intenzitě. V naší aplikaci však slouží pro detekci kontinuálního světelného toku o relativně vysoké energii. Při prvotním nastavování řídicího napětí se muselo postupovat se zvýšenou opatrností, aby nedošlo k přílišnému zvětšení anodového proudu a následnému trvalému poškození fotonásobiče. Z grafu na obrázku 4.16 lze vysledovat závislost mezi napětím mezi fotokatodou a anodou (resp. řídicího napětí, vztah 4.4) a výsledným ziskem. Se změnou napětí o 200 V (řídicí napětí 200 mV) se zisk změní o řád. Na tuto skutečnost se musí brát zřetel při nastavování řídicího napětí. V případě zařazení fotonásobiče do úlohy pro předmět FMZT by bylo vhodné toto napětí vůbec neregulovat a nechat ho fixně nastaveno. Předšlo by se tak případnému poškození ze strany nezkušené obsluhy. Použité napětí tedy bylo zvoleno s ohledem na maximální možný vstupní optický výkon dodaný fotodiodou MBB1F1 přes soustavu optických filtrů tak, aby nedošlo k rychlé saturaci senzoru nebo jeho poškození. Řídicí napětí bylo nastaveno na 300 mV, napětí na trubici fotonásobiče je tedy 300 V.

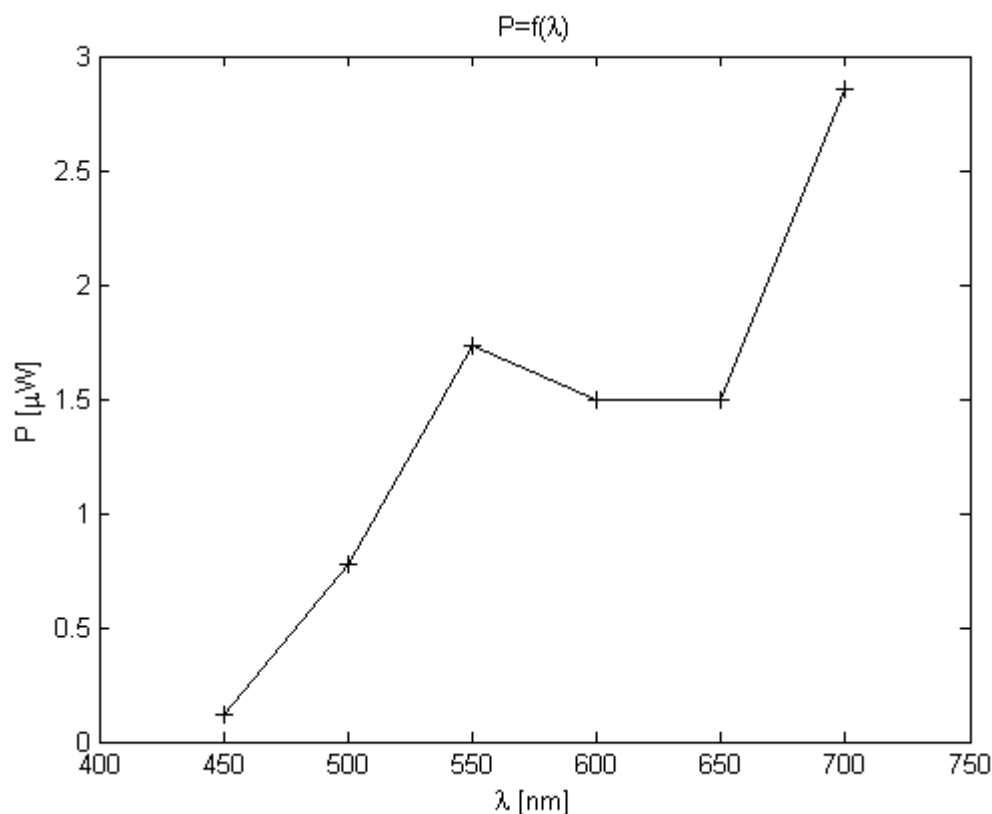
Další komplikací je fakt, že křivka závislosti napětí na zisku (obrázek 4.16) končí u hodnoty kolem 500 V. Technická podpora firmy vyrábějící fotonásobič nebyla prozatím schopna dodat podrobnější grafickou dokumentaci. Díky atypickému tvaru křivky a neznalosti chování fotonásobiče při nižších hodnotách napětí nebylo možné její prodloužení. Jediné vhodné řešení bylo dopočítat hodnotu zisku z referenčních hodnot výkonu. Tuto operaci si můžeme dovolit pouze proto, že aktivní plocha referenčního senzoru S151C je mnohem menší než plocha fotokatody. Předpokládáme tedy, že hodnota optického výkonu detekovaná S151C je hodnotou reálnou. Ze vztahu pro optický výkon (4.3) byl vyjádřen zisk, za optický výkon dosazeny referenční hodnoty. Díky rostoucí chybě měření k nízkým hodnotám detekovaného

optického výkonu byla pro výpočet zisku zvolena varianta filtrující světlo o vlnové délce 700 nm. Pro tuto vlnovou délku byl zisk stanoven na 85. Tato hodnota byla ověřena náčrtem možného pokračování křivky z obrázku 4.16 k nižším hodnotám napětí. Vypočtenou hodnotu zisku musíme brát s rezervou. Pro měření za účelem laboratorní úlohy její nepřesný výpočet postačí, pro přesnější měření však není její použití doporučeno.

$$G = \frac{U}{T_G \cdot S(\lambda) \cdot P} [-] \quad (5.4)$$

Tabulka 5.9: Naměřené a vypočtené hodnoty závislosti přenosu na vlnové délce pro PMM02

č. filtru	λ	U	S	P	P _{REF}	Δ	δ
[-]	[nm]	[V]	[A/W]	[μ W]	[μ W]	[μ W]	[%]
1	700	5,580	0,023	2,8542	2,844	0,010220	0,359351
2	650	4,070	0,032	1,4963	1,503	0,006676	0,444210
3	600	4,820	0,038	1,4923	1,464	0,028460	1,944259
4	550	6,920	0,047	1,7322	1,655	0,077065	4,656227
5	500	3,680	0,056	0,7731	0,728	0,045309	6,225508
6	450	0,653	0,065	0,1182	0,114	0,004190	3,675478



Obrázek 5.7: Graf závislosti naměřeného optického výkonu na vlnové délce, použitý senzor: fotonásobič PMM02

V tabulce 5.8 vidíme vypočtené hodnoty optického výkonu měřeného fotonásobičem PMM02. Pro výpočet byl použit vztah 4.3, kde trans impedanční zisk (TG) je 1 MV/A, senzitivita je odečtena z obrázku 4.15 a zisk je rovnoměrně hodnotě 85. Taktéž byly vypočteny hodnoty absolutní a relativní chyby pro ověření správnosti výpočtu zisku. Dle předpokladu procentuální chyba roste směrem k nižším intenzitám. Na obrázku 5.7 vidíme závislost výkonu na vlnové délce. Tvarově se shoduje se závislostmi předešlých senzorů i s referenčním zařízením. Můžeme tedy potvrdit správnou funkčnost fotonásobiče PMM02.

5.2.2 Přenosové charakteristiky

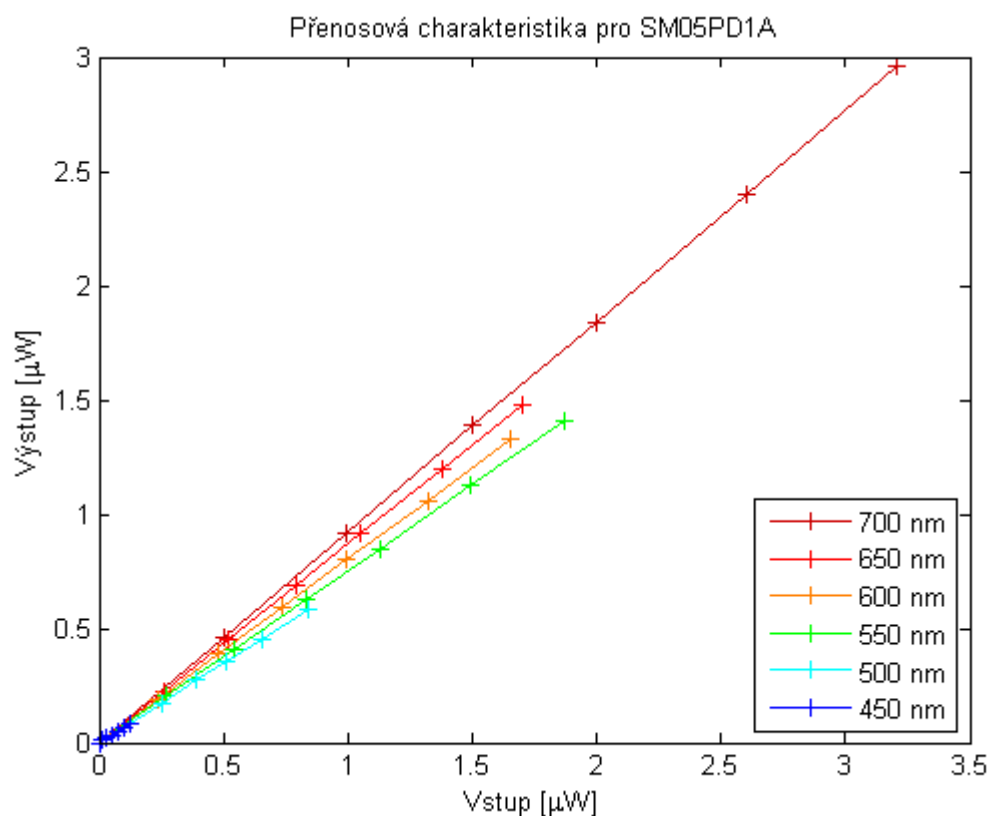
Po ověření správné funkčnosti všech optických detektorů a korektnosti výpočetních vztahů se můžeme pustit do měření přenosových charakteristik. Měření proběhne dle blokového schématu na obrázku 4.1 a bude totožné pro všechny použité senzory. Referenčním wattmetrem PM200 budeme měřit reálnou hodnotu vystupující z optického vlákna, to bude poté přepojeno na vstupy jednotlivých senzorů. Chování detektorů bude proměřeno pro různé intenzity vstupního světla a všech šest vlnových délek. Výsledky budou vyneseny do grafu, kde na ose x bude optický výkon vstupní, na ose y změřený detektorem. Měření pro všechny vlnové délky bude zaneseno do jednoho grafu. Očekávat budeme linearitu přenosu signálu na všech frekvencích. Práce na měření těchto charakteristik byla velice zdoluhavá díky absenci rozděleného vlákna. Přenosové charakteristiky byly měřeny pro šest různých vstupních intenzit, jelikož očekáváme linearitu, více vzorků není zapotřebí měřit.

SM05PD1A

Z naměřených dat a následné vizualizace do grafické podoby pro fotodiody SM05PD1A i DET36A/M jasně vidíme lineární závislost mezi vstupním a výstupním optickým výkonem. Výsledky tedy více než uspokojivě potvrzují teoretický předpoklad o lineárním přenosu. Můžeme tedy konstatovat, že oba detektory nejsou nikterak poškozeny a pracují správně, potvrzena je i funkčnost samotných vzorců pro přepočet výstupního proudu na optický výkon.

Tabulka 5.10: Naměřené a vypočtené hodnoty přenosových charakteristik pro SM05PD1A

$\lambda=700 \text{ nm}$		$\lambda=650 \text{ nm}$		$\lambda=600 \text{ nm}$	
Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup
3,2090	2,9582	1,6993	1,4791	1,6503	1,3256
2,6060	2,4000	1,3785	1,1977	1,3213	1,0590
1,9970	1,8396	1,0528	0,9163	0,9969	0,8000
1,4990	1,3868	0,7886	0,6884	0,7382	0,5949
0,9941	0,9165	0,5212	0,4535	0,4821	0,3872
0,5001	0,4615	0,2617	0,2279	0,2386	0,1923
$\lambda=550 \text{ nm}$		$\lambda=500 \text{ nm}$		$\lambda=450 \text{ nm}$	
Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup
1,8682	1,4059	0,8379	0,5825	0,1270	0,0800
1,4958	1,1235	0,6594	0,4561	0,0990	0,0622
1,1285	0,8500	0,5128	0,3544	0,0730	0,0444
0,8364	0,6294	0,3908	0,2737	0,0530	0,0311
0,5439	0,4088	0,2496	0,1719	0,0320	0,0222
0,2678	0,2029	0,1253	0,0877	0,0140	0,0089

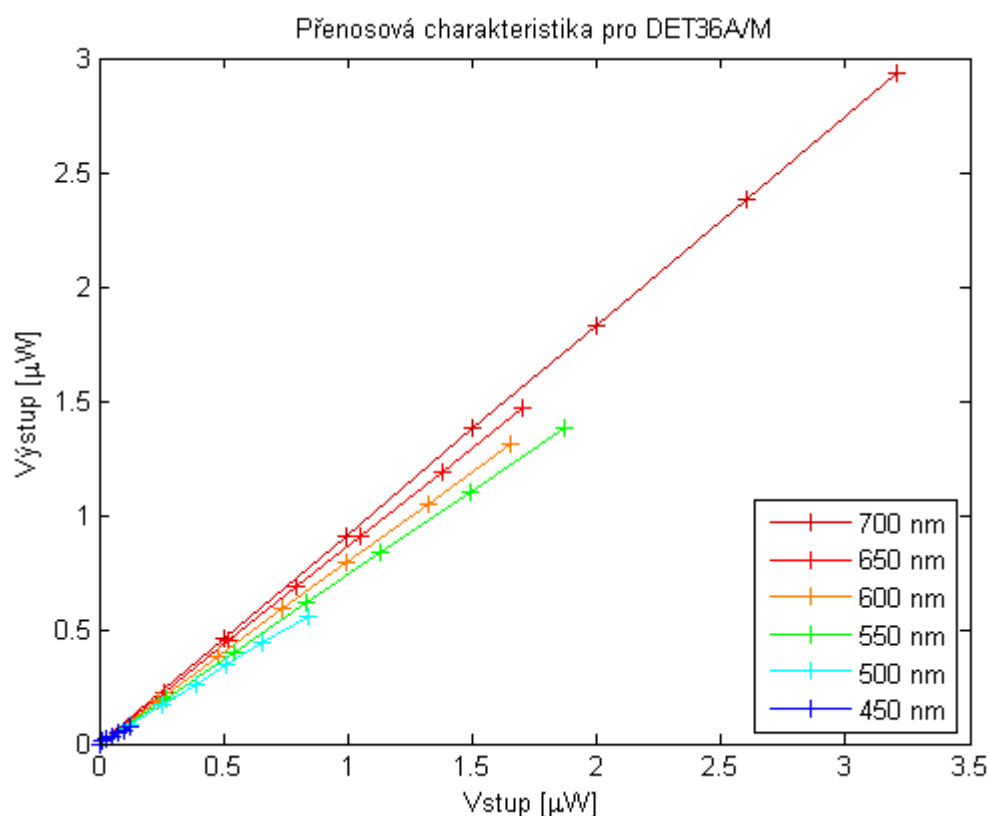


Obrázek 5.8: Graf přenosových charakteristik, použitý senzor fotodiody SM05PD1A

DET36A/M

Tabulka 5.11: Naměřené a vypočtené hodnoty přenosových charakteristik pro DET36A/M

$\lambda=700\text{ nm}$		$\lambda=650\text{ nm}$		$\lambda=600\text{ nm}$	
Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup
3,2090	2,9363	1,6993	1,4698	1,6503	1,3128
2,6060	2,3824	1,3785	1,1884	1,3213	1,0487
1,9970	1,8264	1,0528	0,9093	0,9969	0,7923
1,4990	1,3780	0,7886	0,6860	0,7382	0,5897
0,9941	0,9099	0,5212	0,4512	0,4821	0,3821
0,5001	0,4593	0,2617	0,2279	0,2386	0,1897
$\lambda=550\text{ nm}$		$\lambda=500\text{ nm}$		$\lambda=450\text{ nm}$	
Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup
1,8682	1,3794	0,8379	0,5614	0,1270	0,0756
1,4958	1,1029	0,6594	0,4421	0,0990	0,0578
1,1285	0,8353	0,5128	0,3439	0,0730	0,0444
0,8364	0,6206	0,3908	0,2632	0,0530	0,0311
0,5439	0,4029	0,2496	0,1684	0,0320	0,0178
0,2678	0,2000	0,1253	0,0842	0,0140	0,0089



Obrázek 5.9: Graf přenosových charakteristik, použitý senzor fotodiody DET36A/M

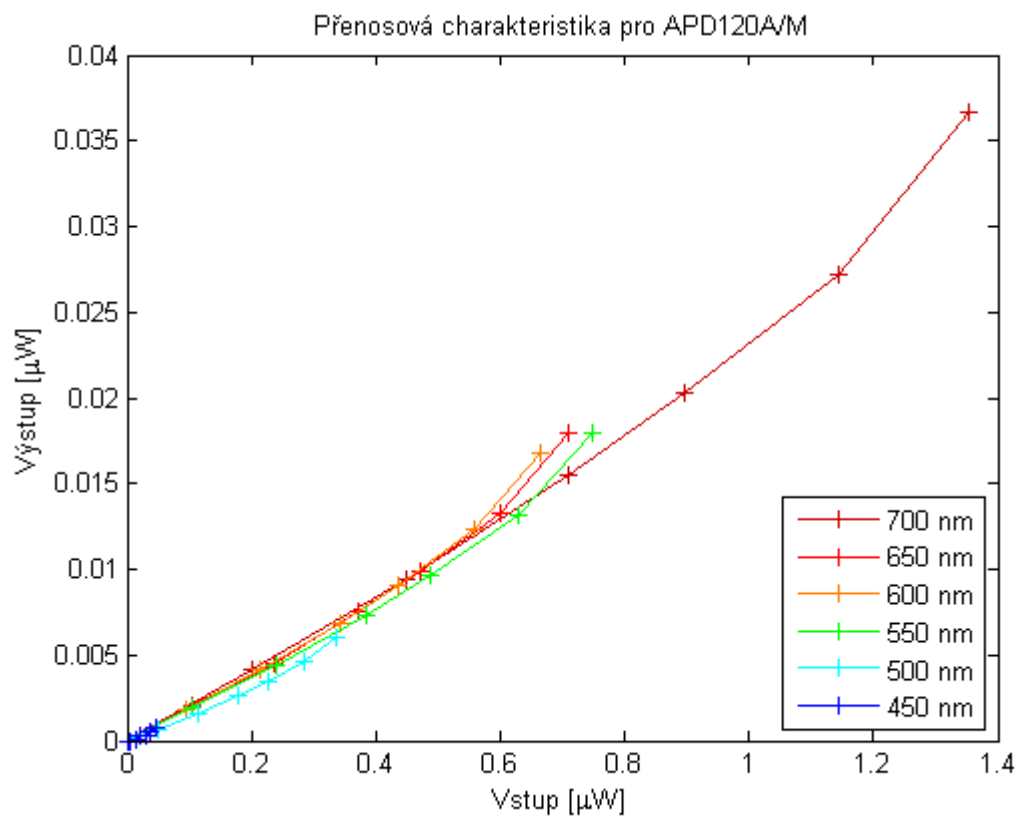
APD120A/M

Při prvním pokusu o naměření přenosových charakteristik u lavinové fotodiody APD120A/M došlo k neočekávanému zvyšování přenosu směrem k vyšším hodnotám

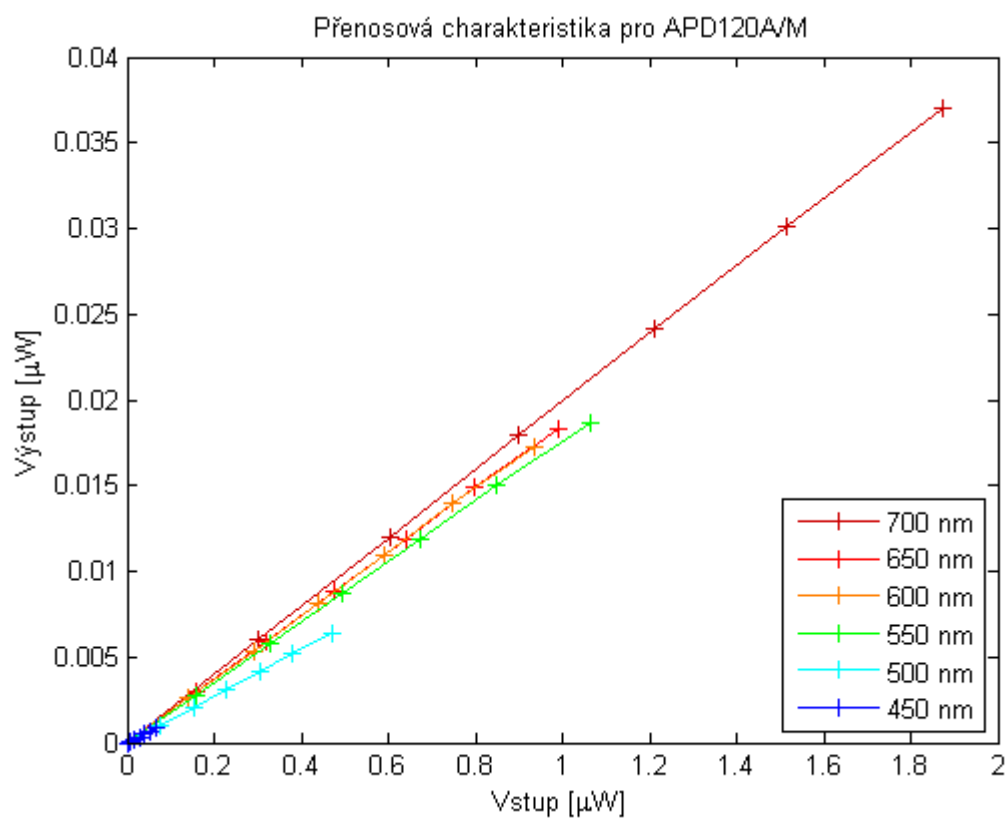
intenzity vstupního světla. Tento jev se projevuje jako konvexní prohnutí křivek na všech frekvencích a lze jej vysvětlit následovně. Díky nezkušenosti obsluhy a neznalosti vnitřních principů fungování lavinového detektoru APD120A/M bylo měření započato hned po sepnutí zařízení, což způsobilo výše zmiňovanou chybu. Detektor se před použitím musí po dobu 5 minut nechat zahřát. Teplota má velký vliv na multiplikační faktor M , ten se mění především v závislosti na teplotě okolí. Malou částí však také přispívá vysoké napětí mezi anodou a katodou. Proto je nutné nechat teplotu působící na PN přechod fotodiody ustálit a tak zamezit změně multiplikačního faktoru. Ten je na teplotě závislý negativně, tedy s rostoucí teplotou klesá. Měření se provádělo od vyšších hodnot výkonu po nižší. Při měření vysokých vstupních výkonů tedy senzor nebyl dostatečně zahřátý, měl nižší teplotu, multiplikační faktor byl tím pádem vyšší. Postupem času došlo k zahřátí, snížení multiplikačního faktoru a k jeho ustálení. Směrem k nižším intenzitám vstupu pozorujeme linearizaci přenosu. Po zjištění této chyby byla přenosová charakteristika pro APD120A/M přeměřena, výsledky viz obrázek 5.11.

Tabulka 5.12: Naměřené a vypočtené hodnoty přenosových charakteristik pro APD120A/M

$\lambda=700 \text{ nm}$		$\lambda=650 \text{ nm}$		$\lambda=600 \text{ nm}$	
Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup
1,3525	0,0366154	0,7110	0,0179429	0,6636	0,0167692
1,1439	0,0271795	0,6010	0,0132229	0,5584	0,0123231
0,8969	0,0203385	0,4713	0,0098514	0,4350	0,0091077
0,7110	0,0154667	0,3733	0,0074857	0,3425	0,0068769
0,4502	0,0094256	0,2360	0,0045486	0,2147	0,0041385
0,2011	0,0041538	0,1056	0,0020000	0,0949	0,0018000
$\lambda=550 \text{ nm}$		$\lambda=500 \text{ nm}$		$\lambda=450 \text{ nm}$	
Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup
0,7490	0,0180000	0,3348	0,0060000	0,0470	0,0007200
0,6294	0,0131333	0,2847	0,0045667	0,0380	0,0005120
0,4890	0,0096667	0,2280	0,0034000	0,0290	0,0003440
0,3847	0,0072889	0,1778	0,0026000	0,0220	0,0002400
0,2401	0,0043778	0,1132	0,0015667	0,0103	0,0001040
0,1057	0,0018889	0,0512	0,0006667	0,0050	0



Obrázek 5.10: Graf přenosových charakteristik, chybné měření, použitý senzor: fotodioda APD120A/M



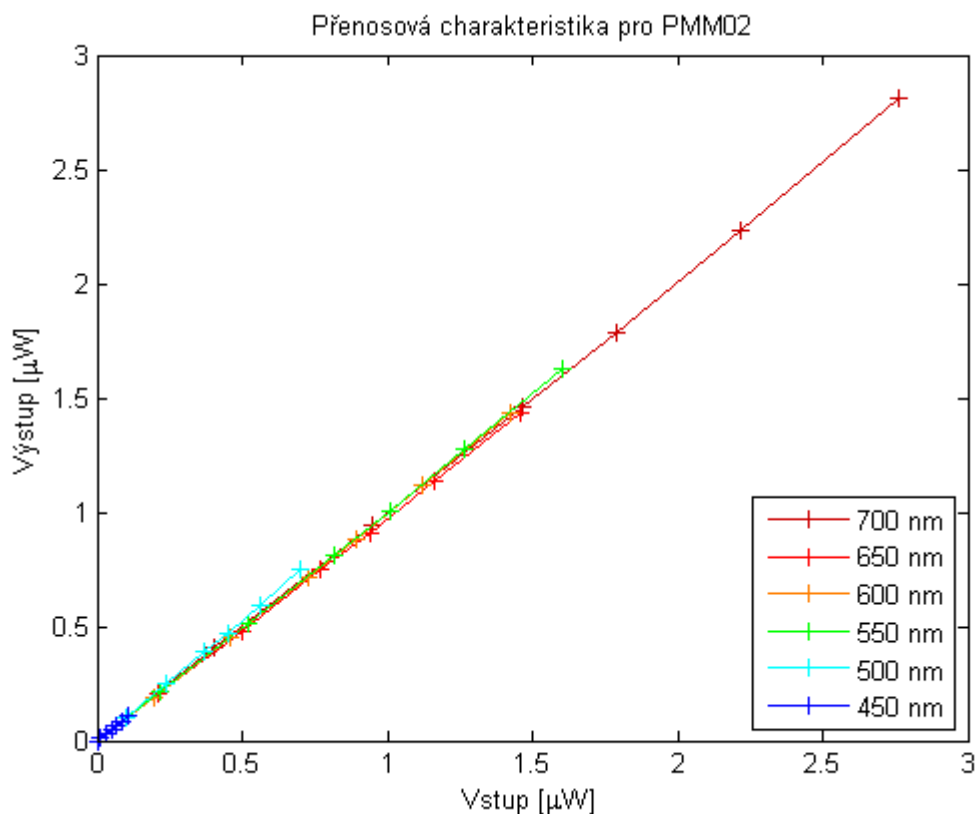
Obrázek 5.11: Graf přenosových charakteristik, správný postup, použitý senzor: fotodioda APD120A/M

PMM02

Výsledky měření přenosových charakteristik pro fotonásobič PMM02 jasně ukazují linearitu přenosu mezi vstupem a výstupem. Na grafu můžeme pozorovat překryv charakteristik pro jednotlivé vlnové délky, který nebyl u jednoduchých fotodiod typu PN a PIN pozorován. Tento jev je způsoben velmi nízkou chybou mezi vstupním a výstupním výkonem, což zapříčinilo dopočítání zisku. Můžeme vidět, že charakteristika pro 500 nm (světle modrá) se odchyluje nejvíce, protože má největší relativní chybu. Pro účely stanovení linearity přenosu však tento jev není na závadu, v naší úloze nepotřebujeme měřit přesné hodnoty optického výkonu, sledujeme pouze linearitu přenosu mezi vstupem a výstupem.

Tabulka 5.13: Naměřené a vypočtené hodnoty přenosových charakteristik pro PMM02

$\lambda=700\text{ nm}$		$\lambda=650\text{ nm}$		$\lambda=600\text{ nm}$	
Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup
2,7640	2,8132992	1,4590	1,4375000	1,4210	1,4334365
2,2150	2,2301790	1,1640	1,1360294	1,1219	1,1207430
1,7870	1,7851662	0,9385	0,9080882	0,8926	0,8854489
1,4658	1,4629156	0,7721	0,7463235	0,7251	0,7182663
0,9473	0,9411765	0,4967	0,4779412	0,4602	0,4551084
0,4062	0,4046036	0,2125	0,2051471	0,1935	0,1910217
$\lambda=550\text{ nm}$		$\lambda=500\text{ nm}$		$\lambda=450\text{ nm}$	
Vstup	Výstup	Vstup	Výstup	Vstup	Výstup
1,6060	1,6299020	0,7008	0,7457983	0,1080	0,1122172
1,2681	1,2745098	0,5607	0,5903361	0,0840	0,0850679
1,0123	1,0073529	0,4535	0,4684874	0,0650	0,0651584
0,8172	0,8112745	0,3706	0,3907563	0,0510	0,0506787
0,5182	0,5122549	0,2376	0,2457983	0,0300	0,0307692
0,2165	0,2144608	0,1013	0,1048319	0,0101	0,0117647

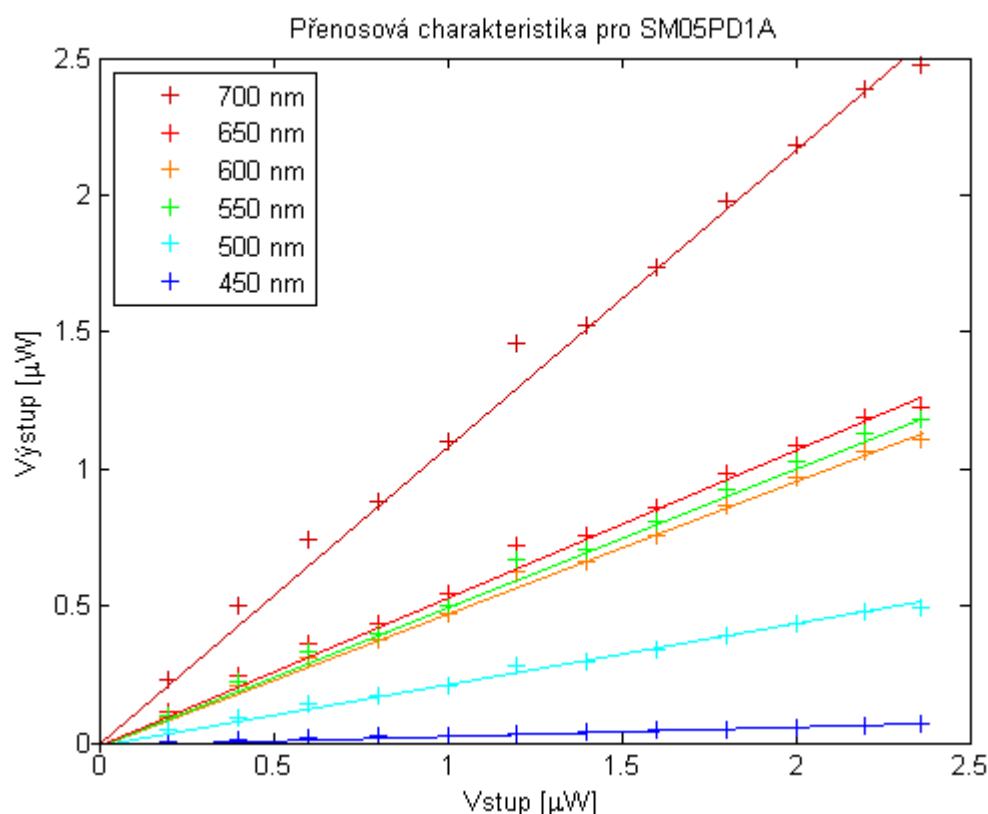


Obrázek 5.12: Graf přenosových charakteristik, použitý senzor fotonásobič PMM02

Jak je patrné z výše uvedených grafů přenosových charakteristik, intenzity optického výkonu pro modré světlo o vlnové délce 450 nm jsou velmi nízké v porovnání s ostatními. Proto byl vyzkoušen alternativní postup měření, kdy je vstupní výkon měřen za pomoci referenčního měřicího zařízení PM200 ještě před vstupem světla do optické části soustavy. Takto získané hodnoty vstupu jsou proto stejné pro všechny měřené vlnové délky, charakteristiky se roztáhnou na stejnou délku, tím lze měřená data lépe analyzovat. Postup však vyžaduje častější přepojování optického vlákna a přesouvání referenčního zařízení z důvodu měření v jiných částech soustavy. Tento postup tedy zavádí chybu způsobenou nestejným zakřivením vláken při měření jednotlivých parametrů. Z toho důvodu bude uveden pouze příklad měření pro jeden detektor, konkrétně fotodiodu typu PN SM05PD1A. Tabulka a graf přenosové charakteristiky viz níže. Z grafu na obrázku 5.13 je jasně vidět výše popisovaná chyba měření.

Tabulka 5.14: Naměřené a vypočtené hodnoty přenosových charakteristik pro SM05PD1A, alternativní měření

	$\lambda=700\text{ nm}$	$\lambda=650\text{ nm}$	$\lambda=600\text{ nm}$	$\lambda=550\text{ nm}$	$\lambda=500\text{ nm}$	$\lambda=450\text{ nm}$
Vstup	Výstup					
2,36	2,47253	1,22791	1,10513	1,17941	0,49123	0,06667
2,20	2,38681	1,18605	1,06154	1,12941	0,47719	0,06222
2,00	2,18462	1,08605	0,96667	1,02941	0,43158	0,05778
1,80	1,97802	0,98140	0,86923	0,92647	0,38947	0,04889
1,60	1,73846	0,86047	0,75897	0,80882	0,34035	0,04444
1,40	1,52747	0,75581	0,66154	0,70588	0,29825	0,04000
1,20	1,45495	0,72326	0,62821	0,66765	0,28070	0,03556
1,00	1,10330	0,54419	0,47179	0,50000	0,21053	0,02667
0,80	0,88132	0,43721	0,37692	0,40000	0,17193	0,02222
0,60	0,73846	0,36512	0,31026	0,32941	0,14035	0,01778
0,40	0,50110	0,24651	0,21026	0,22059	0,09474	0,00889
0,20	0,23297	0,11395	0,09487	0,10000	0,04561	0,00444



Obrázek 5.13: Graf přenosových charakteristik, použitý senzor fotodiody SM05PD1A, alternativní měření

Další možností jak zlepšit vizuální dojem z měřených dat je nastavit vždy stejnou vstupní intenzitu na referenčním zařízení pro všechny vlnové délky. S ohledem na malou intenzitu prošlého záření na vlnové délce 450 nm však tento postup není vhodný. Hodnoty vstupu pro ostatní vlnové délky by musely být sníženy na úroveň odpovídající vlnové délce 450 nm, což

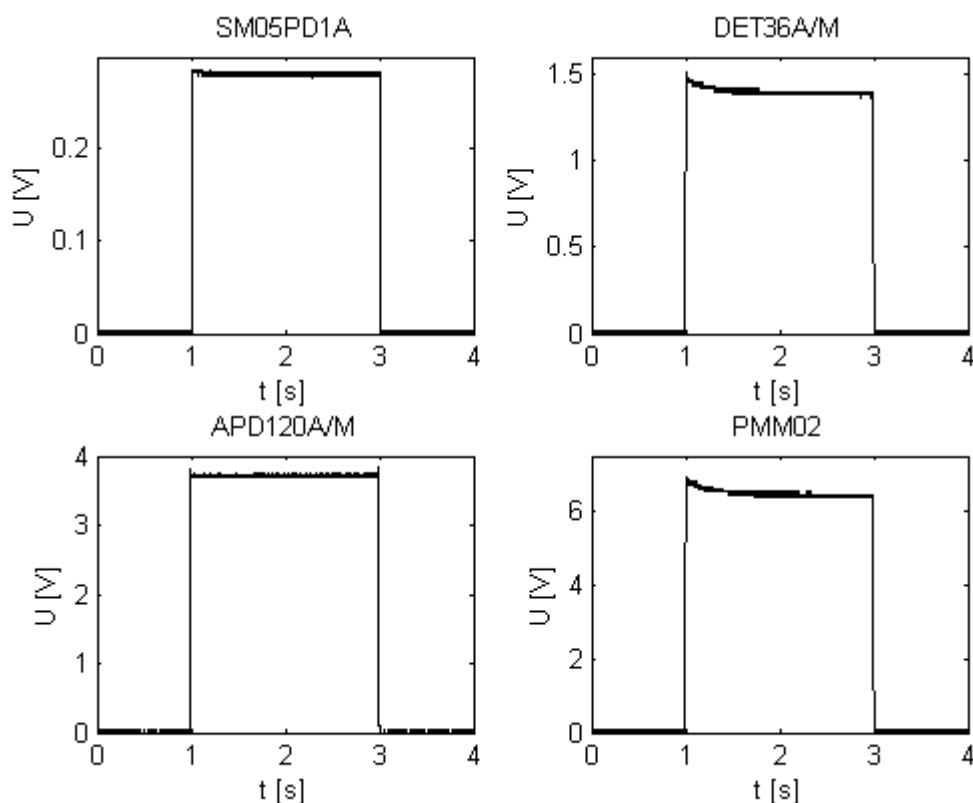
jsou velmi nízké intenzity. Z toho důvodu by došlo k poklesu přesnosti měření, tento postup tedy není doporučen.

5.3 Dynamické vlastnosti

Následující kapitola se bude věnovat měření dynamických charakteristik zkoumaných detektorů. Zapojení měřicí soustavy viz blokové schéma na obrázku 4.2. Zdroj proudu LEDD1B pro LED diodu MBB1F1 byl modulován prostřednictvím generátoru Agilent 33522B obdélníkovým signálem. Tento signál byl nastaven na frekvenci 250 mHz, vysoká hladina na 5 V, nízká na 0 V, offset tedy 2,5 V. Poměr mezi cyklem sepnutí a vypnutí je 50%. Tvary náběžných a sestupných hran byly zaznamenány pomocí osciloskopu Wavesurfer 3022, jehož funkce automatického rozměření byla použita pro zjištění času nárůstu a poklesu, dle principu popsaného v kapitole 3.1. Sledovat budeme tvar obou hran, závislost času odezvy na frekvenci a intenzitě vstupního světla.

5.3.1 Náběžné a sestupné hrany

Pro záznam tvarů náběžných a sestupných hran detektorů byl použit výše zmiňovaný osciloskop Wavesurfer 3022, který díky své vysoké vzorkovací frekvenci umožňuje detailní zobrazení rychlých časových změn. Naměřená data byla prostřednictvím USB portu přenesena do osobního počítače, kde proběhlo jejich zpracování v programu Matlab. Za účelem popisu chování detektorů při rychlé změně vstupní intenzity osvětlení byl vykreslen záznam o délce jedné periody, tedy 4 vteřin. Záznam náběžných a sestupných hran byl pořízen při maximální možné intenzitě světla o vlnové délce 700 nm.

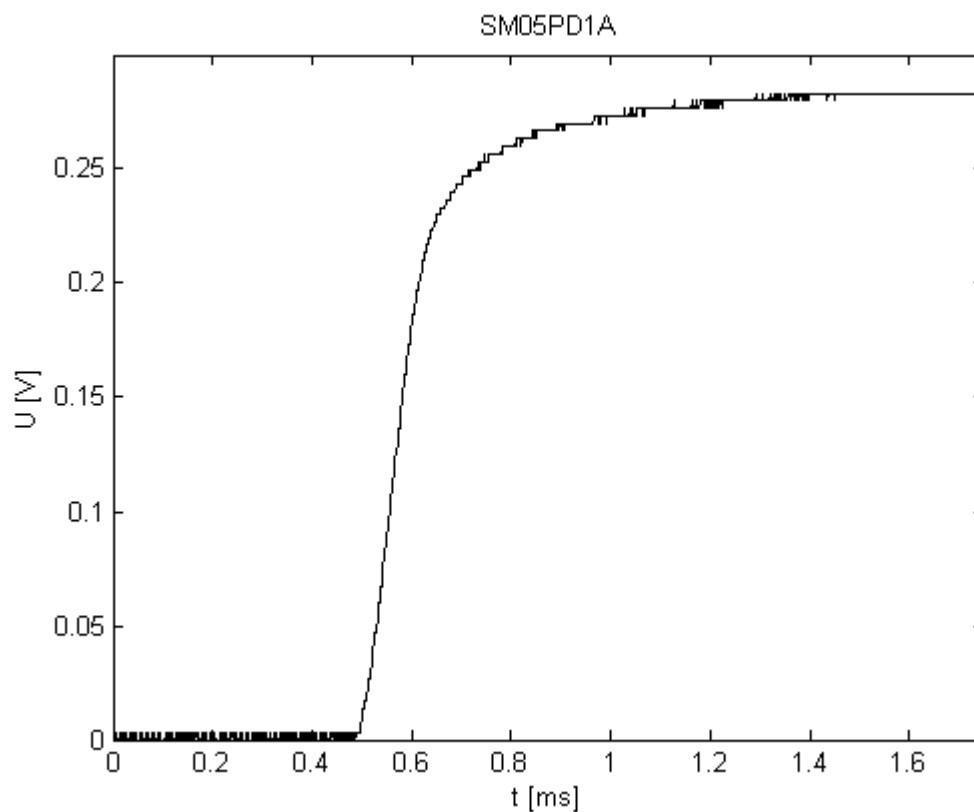


Obrázek 5.14: Reakce detektorů na skokovou změnu vstupní intenzity osvětlení

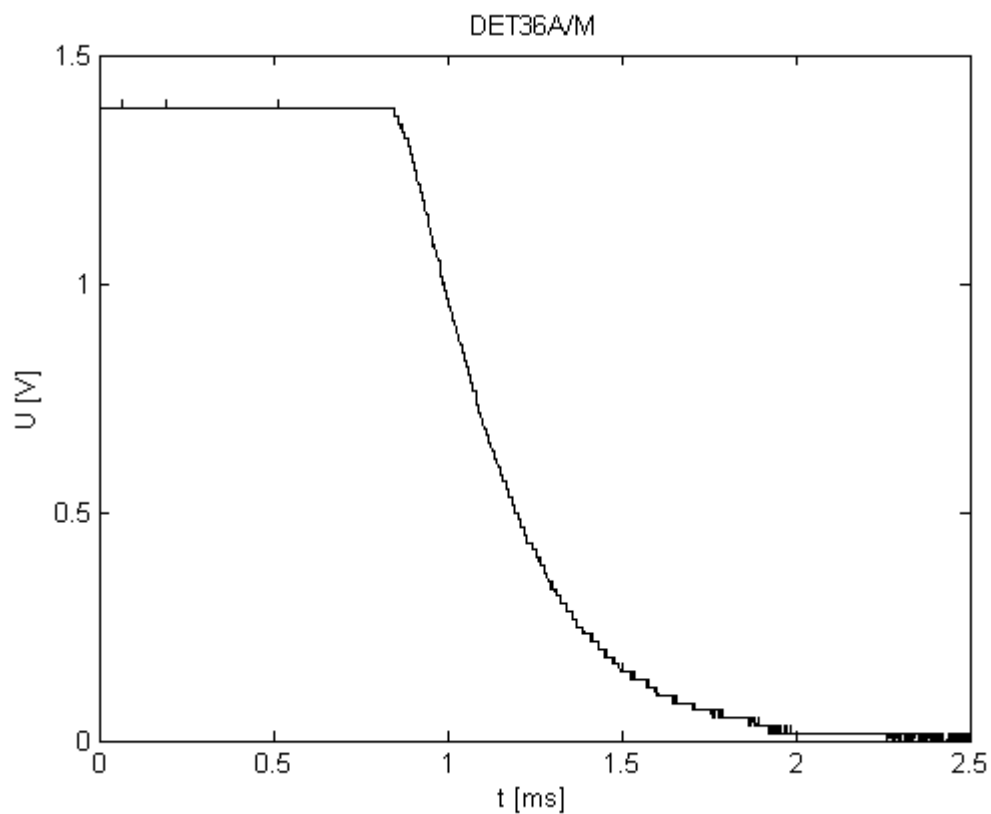
Na obrázku 5.14 vidíme odezvu jednotlivých detektorů na skokovou změnu vstupní intenzity, vybraný úsek jedné periody. Jak můžeme vypořádat, průběh výstupního napětí u všech senzorů kopíruje generovaný obdélníkový průběh. U fotodiody DET36A/M (zapojení se zdroje v závěrném směru, fotokonduktivní režim) a fotonásobiče PMM02 pozorujeme velký napěťový zákmit po sepnutí vstupního signálu, který se do ustálené hodnoty dostane po čase zhruba jedné sekundy. Tento zákmit je u fotodiody způsoben jejím rychlým otevřením a následným napěťovým nárazem. Podobný efekt má na zákmit fotokatoda u fotonásobiče. U fotodiody SM05PD1A (zapojena bez zdroje napětí, pracuje ve fotovoltickém režimu) nedochází k tak velkému zákmitu z důvodu absence externího zdroje napětí, dioda je sama zdrojem malého napětí. Lavinová fotodioda APD120A/M vykazuje pouze minimální zákmit, to můžeme přisoudit dobře navrženým vnitřním obvodům detektoru, to se také odrazilo na její vyšší ceně. Nyní budou zobrazeny tvary náběžných a sestupných hran vybraných detektorů. Ty jsou si tvarově velmi podobné, liší se pouze svojí délkou, proto uvedeme pouze příklady se zřetelnou odlišností.

Na obrázcích 5.15 a 5.16 je vyobrazen detail náběžné a sestupné hrany pro obě použité fotodiody. Jak můžeme vidět, po skokové změně vstupního signálu dojde k prudkému nárůstu, resp. poklesu, výstupního napětí. Po skoku dochází k pozvolnému dosažení požadované hladiny. Křivky svým tvarem připomínají nabíjecí a vybíjecí charakteristiky

kondenzátoru. Hrany byly měřeny pro světlo o vlnové délce 700 nm a vstupním výkonu 3 μW . V popisu grafu jsou uvedeny také časy sepnutí a vypnutí.

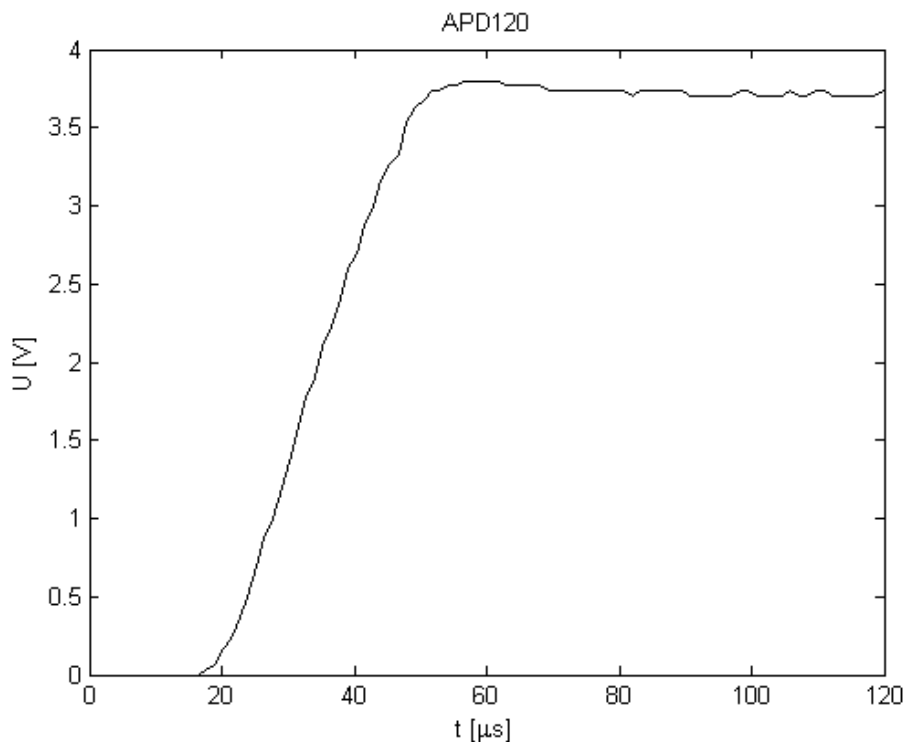


Obrázek 5.15: Náběžná hrana fotodiody SM05PD1A,
parametry: $\lambda=700$ nm, $P=3$ μW , $t_{\text{rise}}=191$ μs



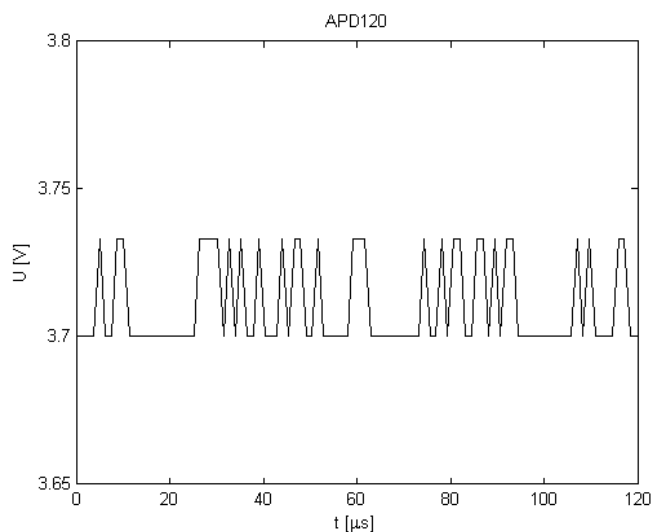
Obrázek 5.16: Sestupná hrana fotodiody DET36A/M,
parametry: $\lambda = 700$ nm, $P = 3$ μ W, $t_{\text{fall}} = 483$ μ s

Za zmínku stojí detail náběžné hrany lavinové fotodiody APD120A/M. Ta díky své precizní konstrukci reaguje na skokovou změnu velmi rychle (v tomto případě pouhých 13 μ s). Její tvar je oproti jednoduché fotodiodě strmější a téměř nedochází k pozvolnému dosažení hladiny. Na obrázku 5.17 můžeme také pozorovat drobný napěťový zákmit o velikosti kolem desítek mV. U ostatních senzorů má tento zákmit výšku v řádu stovek mV, viz obrázek 5.14.



Obrázek 5.17: Náběžná hrana lavinové fotodiody APD120A/M,
parametry: $\lambda = 700 \text{ nm}$, $P = 3 \mu\text{W}$, $t_{\text{rise}} = 13 \mu\text{s}$

Za zmínku také stojí detail úrovně napětí pro sepnutý zdroj světla. Jak vidíme na obrázku 5.18, dochází k nahodilému výskytu šumových špiček. Tento šum je přičten ke stejnosměrnému napětí, které je generováno samotným senzorem. Může se tedy jednat buď o kolísání výkonu zdroje světla, nebo o tepelný šum. K detailnějšímu prozkoumání tohoto jevu by bylo zapotřebí laboratoř vybavit osciloskopem s vyšší vzorkovací frekvencí a menším kvantovacím krokem.



Obrázek 5.18: Detail šumu obsaženého ve výstupním signálu

5.3.2 Čas odezvy

Tato kapitola se bude zabývat časy sepnutí a vypnutí, jejich vztahem mezi vlnovou délkou a intenzitou vstupního světla. Porovnány budou časy odezvy pro jednotlivé senzory. Jako nejrychlejší senzory budeme očekávat lavinovou fotodiodu a fotonásobič, dále pak fotodiodu zapojenou ve fotokonduktivním režimu a nejpomalejší by měla být fotodioda SM05PD1A.

Závislost na vlnové délce

Pro pozorování vlivu frekvence dopadajícího monochromatického světla na rychlost odezvy senzoru je nutné zajistit konstantní optický výkon na všech frekvencích. Díky nelineární vyzařovací charakteristice zdroje MBB1F1 je zapotřebí při měření s každou frekvencí nejdříve nastavit požadovaný výkon. Nejdříve byl vyzkoušen maximální výkon, který vyzařuje LED dioda na vlnové délce 450 nm. Tyto hodnoty však byly příliš malé a na zaznamenávání rychlých změn by jejich použití nebylo vhodné. Proto byl zvolen výkon 0,76 μW , což je maximální výkon na 500 nm. Tím pádem bylo provedeno měření pouze pro pět vlnových délek. Pro přesné nastavení proudu LED diodou (a tedy i vyzářeného výkonu) byl použit generátor Agilent 33522B připojený na LEDD1B v režimu MOD. Při tomto měření bylo napětí na fotonásobiči nastaveno na 300 V.

Tabulka 5.15: Naměřené hodnoty závislosti času odezvy na vlnové délce, $P = 0,76 \mu\text{W}$

	SM05PD1A			DET36A/M			APD120A/M			PMM02		
λ	t_{rise}	t_{fall}	I	t_{rise}	t_{fall}	I	t_{rise}	t_{fall}	U	t_{rise}	t_{fall}	U
[nm]	[μs]	[μs]	[nA]	[μs]	[μs]	[nA]	[μs]	[μs]	[V]	[μs]	[μs]	[V]
700	472	839	315	407	530	313	26	321	1,470	88	336	1,50
650	423	753	280	346	409	271	33	136	1,270	60	152	2,03
600	518	707	234	356	408	231	47	122	0,950	58	138	2,53
550	491	640	191	363	388	187	49	112	0,627	56	112	3,30
500	465	538	149	234	276	143	56	60	0,367	38	80	4,30

Tabulka 5.15 obsahuje naměřené hodnoty času nárůstu (t_{rise}), poklesu (t_{fall}) a výstupní veličiny na vlnové délce. Pokud mezi sebou porovnáme časy nárůstu pro jednotlivé detektory, dojdeme k závěru, že nejrychlejší odezvu na skokovou změnu vstupního signálu má lavinová fotodioda APD120A/M s průměrnou rychlostí odezvy 35 μs . V závěsu je fotonásobič PMM02, s průměrnou rychlostí 50 μs . To však není maximální možná rychlost fotonásobiče, tu lze zvýšit pomocí vyššího napětí mezi fotokatodou a anodou. Měřením se samotným fotonásobičem se bude věnována pozornost později. Třetí je fotodioda DET36A/M pracující ve foto vodivostním režimu, průměr 402 μs , nejpomalejší je fotodioda SM05PD1A v režimu fotovoltaiickém, 474 μs . Vyšší rychlost u fotodiod s připojeným zdrojem napětí v závěrném směru oproti zapojení hradlovému je vykoupěna zvýšeným šumem a tvorbou většího napětového výkmitu.

Závislost mezi vlnovou délkou a časem sepnutí ukazuje, na světlo jaké frekvence materiál aktivní plochy reaguje nejrychleji, neodráží se v ní však spektrální citlivost detektoru. Ta se dá reprezentovat pomocí měření výstupní veličiny, v případě fotodiod anodového proudu, u fotonásobiče a lavinové fotodiody napětí. U senzorů pracujících na principu polovodiče se zkracující se vlnovou délkou klesá hodnota výstupní veličiny. U fotonásobiče je tomu naopak. Tímto měřením byla potvrzena správnost grafů spektrálních citlivostí udávaných výrobcem detektorů, viz obrázky 4.13, 4.14 a 4.15.

V průběhu měření byla zaznamenávána i doba poklesu. U polovodičových součástek by neměla být ovlivněna frekvencí dopadajícího světla, jedná se o čas, za který se PN přechod uvede do rovnovážného, klidového stavu. Sledujeme tedy závislost mezi výstupní veličinou (jak moc volných nosičů náboje bylo v PN přechodu vytvořeno) a časem poklesu. Dle předpokladu čas roste s velikostí výstupní veličiny. Fotonásobič však nemá PN přechod, jeho chování je opačné. S klesající vlnovou délkou je odezva kratší a výstupní veličina vyšší. Tento jev lze vysvětlit na základě interakce fotonu s fotokatodou. Foton o vyšší vlnové délce, nižší frekvenci a nižší energii pronikne méně do hloubky materiálu fotokatydy než je tomu u fotonu o kratší vlnové délce. Nově vzniklý fotoelektron tak musí urazit delší vzdálenost, než se dostane z fotokatydy do prázdného prostoru mezi dynodami. Tento jev má tedy za následek zvýšení obou časů odezvy i nižšího výstupního napětí.

Závislost na intenzitě

U závislosti mezi vstupní intenzitou a výstupní veličiny očekáváme přímou závislost. Nižší počet dopadajících fotonů uvolní menší počet volných nosičů náboje, které se podílí na nárůstu výstupní veličiny. To způsobí také prodloužení reakčního času. U detektorů založených na polovodičové technologii by mělo docházet ke zkracování času vypnutí směrem k nižším vstupním intenzitám, fotonásobič by se měl chovat opačně. Při měření byla nastavena jedna vlnová délka 700 nm, napětí na fotonásobiči 300 V. Výše zmíněné předpoklady jsou potvrzeny v tabulce 5.16. Uveden je pouze jeden typ polovodičové fotodiody a fotonásobič. Ostatní fotodiody se chovají totožně jako SM05PD1A.

Tabulka 5.16: Naměřené hodnoty závislosti času odezvy na vstupní intenzitě, $\lambda = 700$ nm

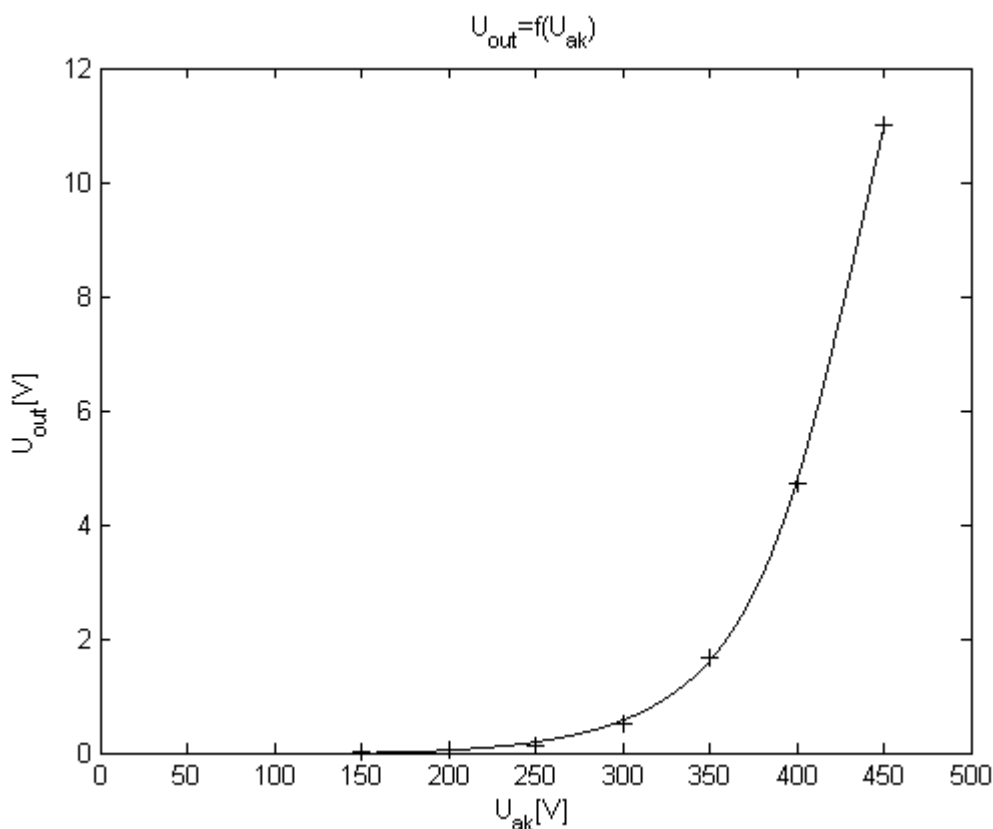
	SM05PD1A			PMM02		
P	t_{rise}	t_{fall}	I	t_{rise}	t_{fall}	U
[μ W]	[μ s]	[μ s]	[nA]	[μ s]	[μ s]	[V]
3,028	198	1012	1,378	180	252	6,30
2,511	218	954	1,143	220	270	5,30
2,006	261	901	0,913	233	278	4,70
1,500	309	892	0,683	262	311	2,81
1,023	375	876	0,465	273	315	1,95
0,502	665	832	0,228	312	345	0,97

Fotonásobič

V této části práce budeme sledovat závislost výstupního napětí (U_{out}) a času odezvy (t_{rise}) fotonásobiče na přiloženém napětí mezi anodou a katodou (U_{ak}). S rostoucím napětím na fotonásobiči budeme očekávat pokles obou sledovaných hodnot. Měření bylo provedeno s fixně nastavenou vlnovou délkou 700 nm a vstupní optický výkon byl nastaven na hodnotu 250 μW . Výsledky jsou shrnuty v tabulce níže.

Tabulka 5.17: Naměřené hodnoty pro závislost výstupní napětí a času odezvy na napětí mezi anodou a katodou fotonásobiče

U_{ak}	U_{out}	t_{rise}
[V]	[V]	[μs]
150	0,0093	551
200	0,0400	493
250	0,1330	450
300	0,5130	428
350	1,6800	374
400	4,7300	354
450	11,0000	316

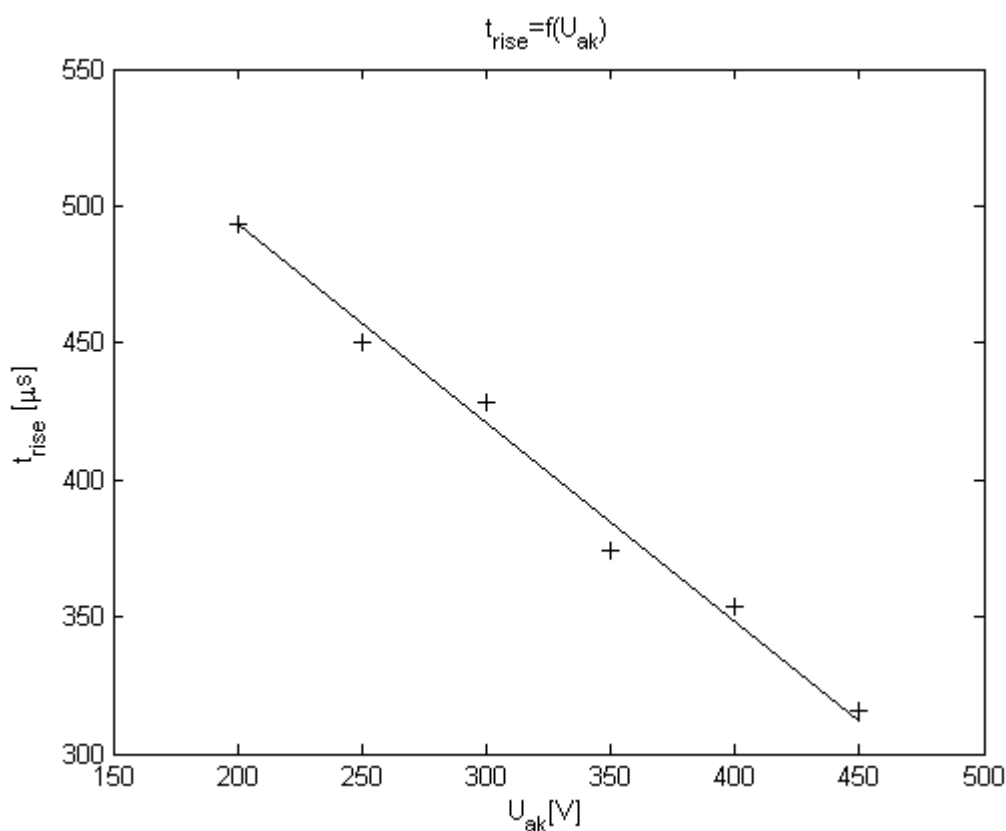


Obrázek 5.19: Graf závislost výstupního napětí na napětí mezi anodou a katodou

Závislost mezi výstupním napětím a napětím mezi fotokatodou a anodou fotonásobiče je zobrazeno na obrázku 5.19. Zapojení fotonásobiče bylo popsáno již výše, ale pro ucelení ho

zopakujeme. K anodě je připojena kladná svorka zdroje napětí, přes odporový dělič je napětí přivedeno na jednotlivé dynody. Na fotokatodě je záporná svorka zdroje. Vyražený elektron z fotokatody je tedy přitahován ke kladnější dynodě, kde vyrazí nejméně další pár elektronů. Dochází tak k exponenciálnímu nárůstu elektronů, tedy výstupní veličiny. V případě, že je mezi jednotlivými dynodami napětí vyšší, může jeden elektron vyrazit více než dva další elektrony. Tento jev je zachycen na obrázku 5.19. S rostoucím přiloženým napětím exponenciálně roste výstupní napětí. Bohužel nebylo možné vyzkoušet celý rozsah řídicího napětí, při přiložených 450 V došlo k tak velkému zesílení, že anodový proud vzrostl nad 100 μA (tedy 10 V na výstupu), což může mít za následek trvalé poškození detektoru.

Z obrázku 5.20 můžeme vypočítat lineární závislost mezi napětím na fotonásobiči a časem sepnutí.



Obrázek 5.20: Graf závislosti času odezvy na napětí mezi anodou a katodou

5.4 Diskuze dosažených výsledků

V předcházejících podkapitolách jsme ověřovali funkčnost navržené měřicí soustavy a sledovali vlastnosti optických detektorů. Nejprve se zaměříme na samotný zdroj světla. Výkon vyzařovaný LED diodou MBB1F1 se po sepnutí ustálí za zhruba 20 minut, což odpovídá času udávanému výrobcem. Dále byla proměřena frekvenční vyzařovací charakteristika zdroje za pomoci referenčního wattmetru PM200, pro šest vlnových délek. Zde nastal rozchod mezi naměřenými a udávanými daty výrobce. Na vlnové délce 700 nm byla naměřena

hodnota téměř dvakrát vyšší než hodnota očekávaná. Tento jev byl přítomen i při měření s jednotlivými detektory. Za účelem proměření vzniku možné chyby byly prostudovány vlastnosti použitých optických filtrů, charakteristika byla proměřena i na spektrofotometru. Žádný z pokusů však nevedl ke stanovení jasného závěru. Díky shodné reakci všech senzorů můžeme poškození referenčního zařízení vyloučit. Při měření se spektrofotometrem byla proměřena celá charakteristika a jednotlivé vlnové délky. Použitý přístroj USB2000+ je však zkonstruován pro měření velmi nízkých intenzit, měření s referenčním wattmetrem bylo provedeno naopak při intenzitách maximálních. Pro změření frekvenční charakteristiky by bylo zapotřebí použít spektrofotometr pro vyšší energie vstupního světla, ten však nebyl k dispozici. Můžeme se tedy pouze domnívat, že u LED diody dojde s rostoucí intenzitou (a tedy vyšším řídicím proudem) ke změně vyzařovací charakteristiky v okolí vlnové délky 700 nm. Tato anomálie však na funkčnost měřicí soustavy nemá vliv, zdroj můžeme použít.

Pro přenos světla z LED diody MBB1F1 ke kolimační čočce by mělo být využito optické vlákno s průměrem jádra 400 μm s numerickou aperturou 0,39, pracující v režimu multimód. Námi použité vlákno P600-1-VIS-NIR má průměr jádra 600 μm , hodnota výkonu po průchodu světla vláknem se proti výstupní hodnotě z LED diody snížila asi o 33%. Jelikož nepotřebujeme na vstupu detektorů příliš velké výkony, vlákno již nebudeme nahrazovat. Problém s rozdvojeným vláknem BIF400-UV-VIS, popsáný v podkapitole 4.3, bude spolu s podrobnějším měřením předložen firmě OceanOptics®. Je možné, že se vlákno při transportu či manipulaci mechanicky poškodilo, což způsobuje rozdíl v útlumech jednotlivých větví. Celé měření tedy bylo provedeno s vlákny jednoduchými, což práci na měření činilo velice zdoluhavou kvůli nutnosti častějšího přepojování optických vláken.

Pro uchycení nekompatibilního držáku kolimačních čoček byla navržena a zkonstruována konverzní deska z hliníkového plechu o síle 4 mm. K této desce je připevněn držák filtrů a dva držáky čoček pomocí šroubů. Otvary v rozích desky lze celý set přichytit k pracovní desce za pomoci čtyř vypodložených šroubů M6. Technický výkres spolu se seznamem všech použitých dílů je přidán do příloh.

Referenční optický wattmetr PM200 v kombinaci s křemíkovým senzorem S151C funguje bezproblémově. Obsluha je velice snadná díky dotykovému displeji, měření by mělo být přesné díky nahraným digitalizovaným korekčním křivkám z vnitřní paměti čidla. Jedinou nepříjemností je nutnost manuálního přepínání hodnoty vlnové délky při každém přepnutí na jiný optický filtr. Hodnoty naměřené s tímto měřicím přístrojem jsou v celé práci považovány za reálné a tedy referenční.

Po ověření funkčnosti měřicí sestavy bylo provedeno měření s jednotlivými detektory. Výstupní anodový proud byl u fotodiod SM05PD1A a DET36A/M měřen za pomoci citlivého nanoampérmetru. Napětí na výstupu fotonásobiče PMM02 a lavinové fotodiody APD120A/M

se pohybuje v řádech jednotek voltů, k jeho záznamu byl použit multimetr. Pro ověření správné funkčnosti senzorů byly proměřeny frekvenční přenosové charakteristiky. Ty byly následně porovnány s charakteristikou vytvořenou z hodnot zaznamenaných referenčním zařízením. Tvarově byly tyto křivky téměř stejné, můžeme tedy prohlásit všechny použité detektory za funkční.

Dále byly sledovány přenosové charakteristiky senzorů. Při tomto měření se sledoval vztah mezi vstupním optickým výkonem a přepočtenou výstupní veličinou na výkon. Měření proběhlo opět pro všech šest vlnových délek světla a šest hodnot intenzit dopadající na citlivou vrstvu detektoru. U všech detekčních zařízení byla pozorována linearita na všech frekvencích. V práci je taktéž uveden výsledek chybného měření s nedostatečně zahrátou lavinovou fotodiodou APD120A/M. Podrobnější komentář viz příslušná kapitola.

Při měření dynamických charakteristik byl využit generátor obdélníkového signálu, byl zaznamenán čas sepnutí a vypnutí v závislosti na vlnové délce a vstupní intenzitě. Díky digitálnímu osciloskopu s vysokou vzorkovací frekvencí bylo možné tvary náběžných a sestupných hran detailně rozměřit a zobrazit off-line prostřednictvím programu Matlab. Výsledky měření uvedené výše plně korespondují s teoretickými předpoklady, čas nárůstu klesá s rostoucí intenzitou, výstupní veličiny se chovají dle vlastností udávaných výrobcem.

Za zmínku stojí měření s fotonásobičem PMM02. Ten umožňuje nastavení výsledného zisku prostřednictvím napětí mezi fotokatodou a anodou, které je úměrné napětí řídicímu. S rostoucím napětím na fotonásobiči lineárně klesala doba odezvy, výstupní veličina rostla exponenciálně. Toto měření osvětluje samotný princip fotonásobiče.

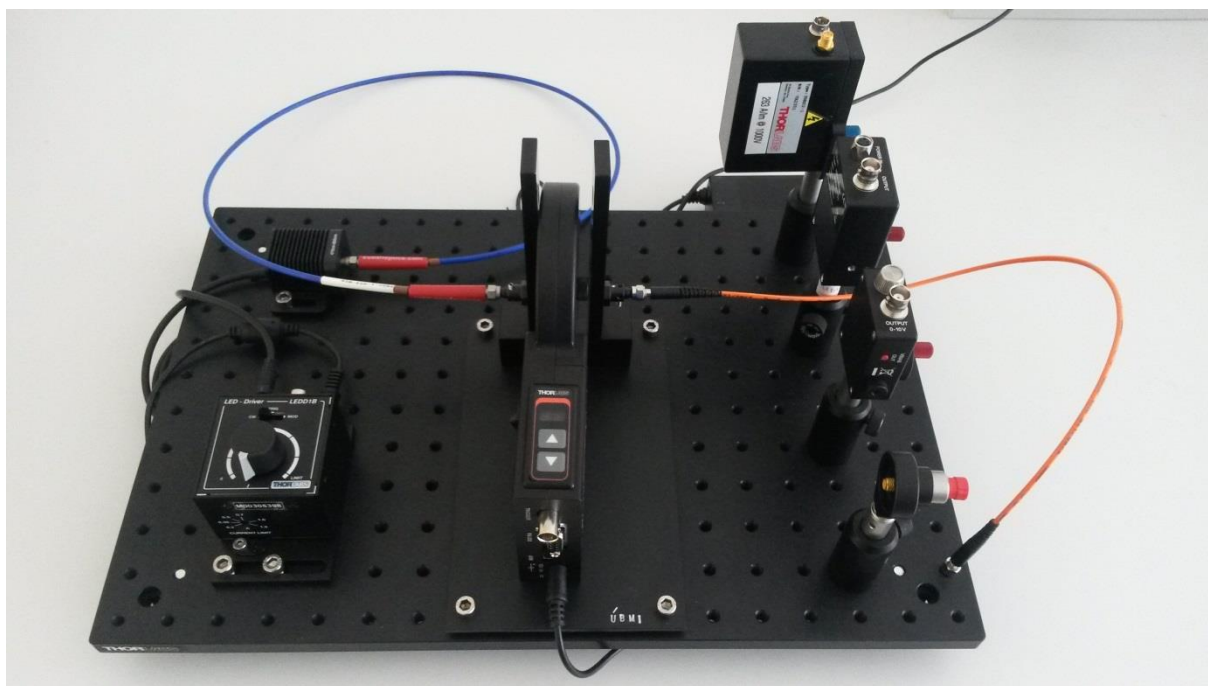
Je nutné se také zmínit o možných vylepšeních měřicí soustavy. Rozhodně by stálo za úvahu pořízení lepšího zdroje světla. Když pomineme onu výše popsanou anomálii zdroje MBB1F1, pro lepší znázornění vlastností optických detektorů by byl vhodnější zdroj s lineární vyzařovací charakteristikou v rozsahu vlnových délek 450 až 700 nm. Takto je celé měření zatíženo nelinearitou zdroje světla a reakce senzorů nemusí být studentům měřicím úlohu úplně zřejmé. Nejlepší by byl zdroj s konstantním vyzařovaným výkonem na všech použitých vlnových délkách. Důležité bude také přidání rozděleného optického vlákna. Díky odeslání pořízeného vlákna na reklamaci byla celá práce měřena s vláknem jednoduchým, což nebyla nikterak pohodlná práce. Musíme také brát v potaz, že častější manipulace s vláknem může být zdrojem jeho poškození, zvláště při měření méně zkušených či manuálně zručných studentů. Další možností kam investovat by mohl být podobný zdroj signálu jako je použití Agilent 33522B. Ten byl použit jak pro modulaci řídicího proudu LED diodou, tak pro řízení napětí na fotonásobiči. Zdroj umožňuje detailní nastavení požadovaného napětí s přesností na tři desetinná místa a umožňuje nastavení napěťového omezení. To by při měření úlohy zabránilo studentům poškodit fotonásobič nerozvážným zacházením. Klasické laboratorní

zdroje nejen že neumožňují tak detailní nastavení nízkých hodnot napětí, ale také nemusí mít na svém výstupu tak velkou přesnost. Pro možnost měření dynamických charakteristik by bylo vhodné pořídit obdobný model digitálního osciloskopu, který byl použit v této práci. Posledním vylepšením by mohl být držák koaxiálních kabelů vedených z výstupu detektorů k měřicím zařízením a kabely opatřit příslušnými popiskami, aby nedošlo k jejich záměně při měření.

V neposlední řadě se diplomová práce věnovala sestavení úlohy a měřicího protokolu pro předmět Mikroskopická zobrazovací technika, vyučovaný v prvním semestru navazujícího magisterského studia oboru Biomedicínské inženýrství a bioinformatika na ÚBMI, FEKT, VUT v Brně. V příloze můžete najít šablonu protokolu s pokyny pro měření a text domácí přípravy. Vzhledem k vybavenosti laboratoře se bude provádět pouze měření statických charakteristik optických detektorů.



Obrázek 5.21: Fotografie celého pracoviště



Obrázek 5.22: Detail osazení pracovní desky

6 Závěr

V teoretické části práce byly shrnuty základní fyzikální poznatky a zákony týkající se světla obecně, fotoelektrického jevu, principu optického vlákna a jeho využití v datových sítích. Popsány jsou také principy použitých detektorů elektromagnetického záření a fungování LED diody.

Praktická část se věnuje návrhu a ověření funkčnosti měřicí soustavy s využitím pořízených komponent. Do provozu byly uvedeny fotodiody SM05PD1A a DET36A/M, lavinová fotodioda APD120A/M, fotonásobič PMM02 a příslušná měřicí technika, optický wattmetr PM200 a PDA200C. Také byly nalezeny nedostatky navržené soustavy, které byly vhodně eliminovány.

Měřením byla ověřena funkčnost jednotlivých komponent navržené sestavy i samotných detektorů. Dále byly měřeny statické i dynamické charakteristiky senzorů, měření prokázalo shodu s teoretickými předpoklady. Výstupem práce je dle zadání návrh protokolu pro laboratorní úlohu do předmětu Mikroskopická zobrazovací technika. Závěrečná diskuse se věnuje možnostem rozšíření této úlohy a možnostmi pořízení lepších komponent pro její zkvalitnění a realizaci.

Seznam literatury

- [1] FUKÁTKO, Tomáš. *Detekce a měření různých druhů záření: přednášky*. 1. vyd. Praha: BEN, 2007, 189 s. ISBN 978-80-7300-193-3.
- [2] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 199 s. ISBN 978-80-7300-114-4.
- [3] MAŤÁTKO, Jan. *Elektronika*. 5. vyd., V [nakl.] Idea servis 3., rozš. vyd. Praha: Idea Servis, 2002. ISBN 80-859-7042-2.
- [4] WILFERT, Otakar. *Optoelektronika I*. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1993, 135 s. ISBN 80-214-0551-1.
- [5] LEPIL, Oldřich, Milan BEDNAŘÍK a Radmila HÝBLOVÁ. *Fyzika pro střední školy*. 3., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2001, 311 s. Učebnice pro střední školy (Prometheus). ISBN 80-719-6185-X.
- [6] SCHUPPLER, David. *Zobrazovací systémy v lékařství*. 1. vyd. Brno: SPŠE Kounicova 16, 2008, 114s.
- [7] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna*: verze 2.1.3. Technická univerzita Ostrava [online]. 2006 [cit. 2015-9-5], s. 172.
- [8] VRBOVÁ, M. 1998. *Úvod do laserové techniky*. Praha, 228 s. ISBN 80-010-1108-9.
- [9] ĎAĎO, Stanislav. *Senzory a měřicí obvody*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, 315 s. ISBN 80-010-2057-6.
- [10] KUPKA, Karel, Jozef KUBINYI a Martin ŠÁMAL. *Nukleární medicína*. 1. vyd. Praha: P3K, c2007, 185, xiv s. ISBN 978-809-0358-492.
- [11] Thorlabs inc. Newton, New Jersey, USA. *LEDD1B Operation Manual*. 14. 2. 2012. 23 s.
- [12] Thorlabs inc. Newton, New Jersey, USA. *MBB1F1 Spec Sheet*. 16. 9. 2013. 2 s.
- [13] Thorlabs inc. Newton, New Jersey, USA. *FW102C User Guide*. 21. 4. 2014. 18 s.
- [14] Thorlabs inc. Newton, New Jersey, USA. *S151C Spec Sheet*. 10. 4. 2013. 2 s.
- [15] Thorlabs inc. Newton, New Jersey, USA. *PM200 Operation Manual*. 8. 2. 2012. 72 s.
- [16] Thorlabs inc. Newton, New Jersey, USA. *SM05PD1A Spec Sheet*. 20. 7. 2012. 4 s.

- [17] Thorlabs inc. Newton, New Jersey, USA. *DET36A/M Spec Sheet*. 7. 1. 2013. 18 s.
- [18] Thorlabs inc. Newton, New Jersey, USA. *APD120A Operation Manual*. 14. 11. 2013. 21 s.
- [19] Thorlabs inc. Newton, New Jersey, USA. *PMM02 User Guide*. 24. 1. 2012. 14 s.
- [20] Thorlabs inc. Newton, New Jersey, USA. *PDA200C Operation Manual*. 30. 1. 2014. 20 s.

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Elektromagnetické spektrum	7
Obrázek 2.2: Představa fotonu	10
Obrázek 2.3: Totální odraz v optickém vlákně	11
Obrázek 2.4: Vnější fotoelektrický jev	14
Obrázek 2.5: Vnitřní fotoelektrický jev	15
Obrázek 3.1: Ukázka rozměření doby nárůstu (risetime)	18
Obrázek 3.2: Fotonásobič se scintilačním krystalem	19
Obrázek 3.3: Fotodioda v obvodu, zleva hradlové, závěrné zapojení	20
Obrázek 3.4: Konstrukce lavinové fotodiody	21
Obrázek 4.1: Blokové schéma pracoviště pro měření spektrálních charakteristik detektorů	23
Obrázek 4.2: Blokové schéma pracoviště pro měření dynamických charakteristik	24
Obrázek 4.3: Zadní a čelní panel LEDD1B	25
Obrázek 4.4: Horní panel LEDD1B s uživatelským rozhraním	26
Obrázek 4.5: LED dioda MBB1F1 v hliníkovém chladiči	26
Obrázek 4.6: Spektrum MBB1F1	27
Obrázek 4.7: Rozdvojení vlákna BIF-400-UV-VIS	28
Obrázek 4.8: Držák filtrů FW102C	29
Obrázek 4.9: Graf závislosti transmise na vlnové délce pro filtr FB500-10	30
Obrázek 4.10: Čočka a držák ze série 74 od firmy Ocean Optics®	30
Obrázek 4.11: Technický výkres spojovací desky pro držák filtrů a čoček	31
Obrázek 4.12: Senzor S151C (vlevo) a optický wattmetr PM200	33

Obrázek 4.13: Fotodiody SM05PD1A (vlevo) a DET36A/M	34
Obrázek 4.13: Graf závislosti přenosu na vlnové délce pro SM05PD1A a DET36A/M	35
Obrázek 4.14: Graf závislosti přenosu na vlnové délce pro APD120A/M	36
Obrázek 4.15: Graf závislosti senzitivity na vlnové délce pro PMM02	37
Obrázek 4.16: Graf závislosti zisku na napětí pro PMM02	38
Obrázek 5.1: Graf závislosti optického výkonu LED diody MBB1F1 na čase	40
Obrázek 5.2: Graf naměřené frekvenční charakteristiky LED diody MBB1F, proud 500 mA	43
Obrázek 5.3: Spektrum LED diody MBB1F změřené pomocí spektrofotometru USB2000+	44
Obrázek 5.4: Graf závislosti naměřeného optického výkonu na vlnové délce, použitý senzor: fotodioda SM05PD1A	46
Obrázek 5.5: Graf závislosti naměřeného optického výkonu na vlnové délce, použitý senzor: fotodioda DET36A/M	47
Obrázek 5.6: Graf závislosti naměřeného optického výkonu na vlnové délce, použitý senzor: lavinová fotodioda APD120A/M	48
Obrázek 5.7: Graf závislosti naměřeného optického výkonu na vlnové délce, použitý senzor: fotonásobič PMM02	50
Obrázek 5.8: Graf přenosových charakteristik, použitý senzor fotodioda SM05PD1A	52
Obrázek 5.9: Graf přenosových charakteristik, použitý senzor fotodioda DET36A/M	53
Obrázek 5.10: Graf přenosových charakteristik, chybné měření, použitý senzor: fotodioda APD120A/M	55
Obrázek 5.11: Graf přenosových charakteristik, správný postup, použitý senzor: fotodioda APD120A/M	55
Obrázek 5.12: Graf přenosových charakteristik, použitý senzor fotonásobič PMM02	57
Obrázek 5.13: Graf přenosových charakteristik, použitý senzor fotodioda SM05PD1A, alternativní měření	58

Obrázek 5.14: Reakce detektorů na skokovou změnu vstupní intenzity osvětlení	60
Obrázek 5.15: Náběžná hrana fotodiody SM05PD1A, parametry: $\lambda=700$ nm, $P=3 \mu\text{W}$, $t_{\text{rise}}=191 \mu\text{s}$	61
Obrázek 5.16: Sestupná hrana fotodiody DET36A/M, parametry: $\lambda = 700$ nm, $P = 3 \mu\text{W}$, $t_{\text{fall}} = 483 \mu\text{s}$	62
Obrázek 5.17: Náběžná hrana lavinové fotodiody APD120A/M, parametry: $\lambda = 700$ nm, $P = 3 \mu\text{W}$, $t_{\text{rise}} = 13 \mu\text{s}$	63
Obrázek 5.18: Detail šumu obsaženého ve výstupním signálu	63
Obrázek 5.19: Graf závislost výstupního napětí na napětí mezi anodou a katodou	66
Obrázek 5.20: Graf závislost času odezvy na napětí mezi anodou a katodou	67
Obrázek 5.21: Fotografie celého pracoviště	70
Obrázek 5.22: Detail osazení pracovní desky	71

Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Vlnové délky a frekvence pro jednotlivé barvy viditelného spektra	8
Tabulka 4.1: Nejdůležitější vlastnosti LEDD1B	26
Tabulka 4.2: Umístění optických filtrů v revolverovém držáku FW102C	29
Tabulka 4.3: Nejdůležitější vlastnosti S151C	32
Tabulka 4.4: Srovnání nejdůležitějších vlastností SM05PD1A a DET36A/M	34
Tabulka 4.5: Nejdůležitější vlastnosti APD120A/M	36
Tabulka 4.6: Nejdůležitější vlastnosti PMM02	37
Tabulka 5.1: Naměřené hodnoty pro závislost optického výkonu LED diody MBB1F1 na čas	40
Tabulka 5.2: Naměřené hodnoty pro útlum optických vláken	41
Tabulka 5.3: Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření útlumu optické soustavy	42
Tabulka 5.4: Naměřené optické výkony pro jednotlivé vlnové délky	42
Tabulka 5.5: Hodnoty responsivity a senzitivity pro jednotlivé detektory	45
Tabulka 5.6: Naměřené a vypočtené hodnoty pro závislost přenosu na vlnové délce pro SM05PD1A	45
Tabulka 5.7: Naměřené a vypočtené hodnoty pro závislost přenosu na vlnové délce pro DET36A/M	47
Tabulka 5.8: Naměřené a vypočtené hodnoty závislosti přenosu na vlnové délce pro APM120A/M	48
Tabulka 5.9: Naměřené a vypočtené hodnoty závislosti přenosu na vlnové délce pro PMM02	50
Tabulka 5.10: Naměřené a vypočtené hodnoty přenosových charakteristik pro SM05PD1A	52
Tabulka 5.11: Naměřené a vypočtené hodnoty přenosových charakteristik pro DET36A/M	53

Tabulka 5.12: Naměřené a vypočtené hodnoty přenosových charakteristik pro APD120A/M	54
Tabulka 5.13: Naměřené a vypočtené hodnoty přenosových charakteristik pro PMM02	56
Tabulka 5.14: Naměřené a vypočtené hodnoty přenosových charakteristik pro SM05PD1A, alternativní měření	58
Tabulka 5.15: Naměřené hodnoty závislosti času odezvy na vlnové délce, $P = 0,76 \mu\text{W}$	64
Tabulka 5.16: Naměřené hodnoty závislosti času odezvy na vstupní intenzitě, $\lambda = 700 \text{ nm}$	65
Tabulka 5.17: Naměřené hodnoty pro závislost výstupní napětí a času odezvy na napětí mezi anodou a katodou fotonásobiče	66

Seznam příloh na CD

- *martin_smrz_DP.pdf*, diplomová práce

Složka Data

- *C1sm05pd1a00000.dat*, data z osciloskopu, detektor SM05PD1A
- *C1det36am00000.dat*, data z osciloskopu, detektor DET36A/M
- *C1apd120am00000.dat*, data z osciloskopu, detektor APD120A/M
- *C1pmm0200000.dat*, data z osciloskopu, detektor PMM02

Složka Úloha

- *protokol.pdf*, návrh protokolu úlohy
- *priprava.pdf*, text domácí přípravy

Složka Komponenty

- *vykres.pdf*, technický výkres desky
- *seznam.pdf*, seznam použitých přístrojů a součástek