

Měření malých optických signálů

Measuring Small Optical Signals

Bc. Aneta Dubová

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Aneta Dubová**
Osobní číslo: **A13361**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Měření malých optických signálů**

Téma anglicky: **Measuring Small Optical Signals**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte literární rešerši na téma detekce slabých toků optického záření.
2. Popište základní metody zpracování signálů, které jsou užívány při experimentech se slabými optickými toky záření.
3. Seznamte se s aplikacemi výše uvedených metod v oblasti bezpečnostních technologií.
4. Sestavte experimentální zařízení pro měření slabých toků záření za účelem hodnocení šedých filtrů s vysokými hodnotami optické hustoty.
5. Proveďte měření a ze zpracovaných dat navrhnete možnosti zlepšení poměru signálu a šumu použitého experimentálního zařízení.
6. Navrhnete využití sestavené aparatury pro vybrané aplikace v průmyslu komerční bezpečnosti.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. RIEKE, G. *Detection of light: from the ultraviolet to the submillimeter*. 2nd ed. New York, NY: Cambridge University Press, 2003, xi, 363 p. ISBN 0521017106.
2. HODGKINSON, Jane a Ralph P TATAM. *Optical gas sensing: a review*. *Measurement Science and Technology* [online]. 2013, 24(1), 012004- [cit. 2016-02-04]. DOI: 10.1088/0957-0233/24/1/012004. ISSN 0957-0233. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0957-0233/24/i=1/a=012004?key=crossref.186f22f51705291454051e991ac0a72d>.
3. PELANT, Ivan a Jan VALENTA. *Luminescence spectroscopy of semiconductors*. 1st pub. New York: Oxford University Press, 2012, xiv, 542 s. ISBN 978-0-19-958833-6.
4. HAWKES, P a John C SPENCE. *Science of microscopy*. 1. New York: Springer, 2007, 2 v. (xviii, 1265, 126 p.). ISBN 03-872-5296-7.
5. SIEGEL, Jay A a Pekka SAUKKO (eds.). *Encyclopedia of forensic sciences*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013, xliii, 412 s. ISBN 978-0-12-398365-7.
6. STUART Barbara. *Forensic Analytical Techniques*, Wiley 2013.

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.**

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce: **5. února 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

Ve Zlíně dne 5. února 2016.

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na měření slabých optických signálů a následně jejich využití v průmyslu komerční bezpečnosti. Popisuje základní fyzikální pojmy následně pak popis aktivních detektorů. Poté je pomocí sestavené aparatury měřena míra propustnosti jednotlivých šedých filtrů. Prostřednictvím naměřených a zpracovaných dat je navrženo zlepšení poměru signálu a šumu experimentálního zařízení a v závěru práce je nastíněno využití této aparatury v bezpečnostních systémech.

Klíčová slova: slabé optické signály, Lock-In, detektory, fotodioda, laser, optická hustota, šum.

ABSTRACT

Abstrakt ve světovém jazyce

The thesis is focused on the measurement of small optical signals and consequently their use in commercial security industry. It describes the basic physics concepts followed by a description of active detectors. Then, using the assembled apparatus measured the transmission rate of the individual gray filters. Through the measured and processed data is designed to improve signal to noise ratio of experimental equipment and the conclusion is outlined using this apparatus in the safety systems.

Keywords: Small Optical Signals, Lock-In, Detectors, Photodiode, Laser, Optical Density, Noise.

Poděkování, motto

Touto cestou chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc, především za jeho čas, výborné vedení a odborné rady. Velké díky patří i mé rodině, která mě při studiu velmi podporovala a vkládala do mě veškeré naděje a umožnila mi studovat.

„Never give up!“

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ POJMY.....	11
1.1 ZDROJE SVĚTLA.....	12
1.1.1 Luminiscenční diody.....	13
1.1.2 Laserové diody.....	14
1.2 ŠÍŘENÍ SVĚTLA PROSTŘEDÍM.....	14
1.2.1 Rozklad světla.....	14
1.2.2 Pohlcování světla.....	15
1.2.3 Rozptyl světla.....	15
1.3 INTERFERENCE SVĚTLA.....	16
1.4 OHYB SVĚTLA.....	17
1.5 DENZITOMETRIE.....	18
1.6 DETEKCE ZÁŘENÍ.....	18
1.6.1 PIN fotodiody.....	19
1.6.2 Lavinové fotodiody.....	19
1.7 TYPY DETEKTORŮ.....	19
2 METODY ZPRACOVÁNÍ SLABÝCH OPTICKÝCH SIGNÁLŮ.....	21
2.1 DETEKCE S FOTONÁSOCIČEM.....	21
2.2 DETEKCE S OPERAČNÍMI ZESILOVAČI.....	22
2.3 DETEKCE S TRANSIMPEDANČNÍMI ZESILOVAČI.....	23
2.4 METODY OPTICKÉ DETEKCE DLE MODULACE.....	23
2.4.1 Metoda spínané integrace.....	24
2.4.2 Metoda čítání fotonů.....	24
2.4.3 Metoda Lock-In.....	26
2.5 ŠUM.....	26
2.5.1 Johnsonův šum.....	27
2.5.2 Shot šum.....	28
2.5.3 Blikavý šum.....	28
3 APLIKACE METOD ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU V OBLASTI BEZPEČNOSTNÍCH TECHNOLOGIÍ.....	29
3.1 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ.....	29
3.2 DETEKCE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ.....	29
3.2.1 Typy detektorů podle principu detekce.....	29
3.2.2 Typy detektorů dle komplexnosti měřené informace.....	30
3.3 LUMINISCENČNÍ METODY.....	30
3.3.1 Rozdělení luminiscence.....	30

3.4	ELEKTROLUMINISCENCE	31
3.5	FOTOLUMINISCENCE.....	31
3.6	INFRAČERVENÉ ZÁVORY.....	31
3.7	INFRAČERVENÉ BARIÉRY	32
3.8	INFRAČERVENÉ ZÁCLONY.....	32
3.9	AKTIVNÍ INFRAČERVENÉ DETEKTORY	32
3.10	LASEROVÉ ZÁVORY	33
II	PRAKTICKÁ ČÁST	34
4	SEZNÁMENÍ SE S EXPERIMENTÁLNÍM ZAŘÍZENÍM	35
4.1	LASER	35
4.2	LASEROVÝ MĚŘIČ VÝKONU	36
4.3	OPTICKÝ CHOPPER.....	38
4.4	OPTICKÉ FILTRY	39
4.5	PŘEDZESILOVAČ.....	40
4.6	FOTODIODA	41
4.7	LOCK-IN SR 830 DSP	42
5	MĚŘENÍ OPTICKÉ HUSTOTY A VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ FOTODIODĚ.....	43
5.1	MĚŘENÍ OPTICKÉ HUSTOTY FILTRU	44
5.2	MĚŘENÍ VÝKONU LASERU	50
5.3	MĚŘENÍ ODPORU FOTODIODY	52
5.4	MĚŘENÍ LINEARITY HUSTOTY	52
6	NÁVRH VYUŽITÍ ZAŘÍZENÍ V PKB	55
	ZÁVĚR	57
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	60
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	65
	SEZNAM OBRÁZKŮ	67
	SEZNAM TABULEK.....	68
	SEZNAM PŘÍLOH.....	70

ÚVOD

Optoelektronika je vědní obor, který se zabývá přeměnou elektrických signálů na signály optické a obráceně. Optika je věda, která studuje zákonitosti světelných jevů a zabývá se také detekcí světla. Tento vědní obor sahá až do 17. století. Světlo je hlavním faktorem optiky. Většina populace považuje světlo za samozřejmost a hlouběji nad ním nepřemýšlí a většina z nás si vůbec neuvědomuje, jak velký význam pro nás světlo má. Elektromagnetické záření má velký význam pro život živočichů a rostlin. Je známo, že elektromagnetické záření se skládá ze složek, kdy některé z nich pohlcuje atmosféra, a některé prostupují na zemský povrch a jsou vnímány lidským okem. Filtry chrání náš zrak před škodlivými vlivy a také jsou schopny pozměnit vnímání světelných impulsů.

V běžném životě člověk ani netuší, kde všude se filtry setkává.

Díky neustálému rozvoji a nové technice má světlo široké využití nejen ve vědeckých pracovištích, domácnostech, ale i průmyslu komerční bezpečnosti k ochraně osob a majetku.

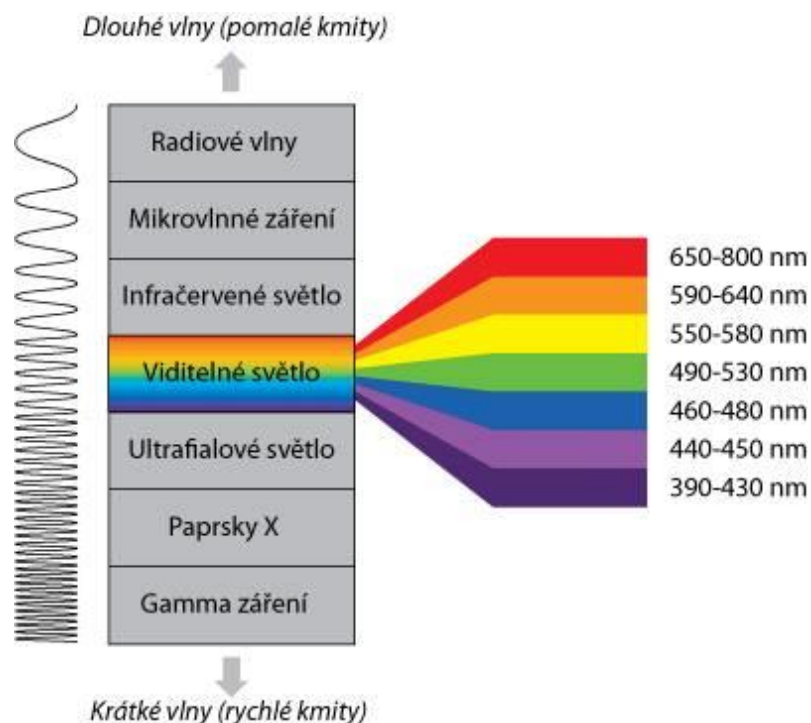
Cílem diplomové práce je sestavení experimentálního zařízení, které je schopné měřit slabé optické signály. Ještě před samotnou praktickou částí, budou vysvětleny základní fyzikální pojmy. Další důležitou informací bude popis metod zpracování slabých optických signálů. Teoretická část se bude také zabývat detektory optického záření, které jsou používány v bezpečnostních aplikacích.

V praktické části bude popsán a vysvětlen jednotlivý princip zařízení, která jsou zapojena do obvodu. Po této deskripci a seznámením se s jednotlivými přístroji, bude přistoupeno k samotnému měření. Při měření se musí počítat s optickou aberací, protože ideální podmínky existují pouze ve vakuu. Jestliže je nutné, aby bylo měření co nejpřesnější, musí se vždy brát v potaz působení vnějších vlivů na jednotlivá zařízení. Při správném měření bude možno z výsledků navrhnout využití těchto slabých optických signálů v průmyslu komerční bezpečnosti, dále jen „PKB“.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ POJMY

Optiku řadíme k nejstarším oborům fyziky. Zabývá se podstatou světla a zákonitostmi světelných jevů, které vznikají při šíření světla a jeho působení na látky. Světlo různých vlnových délek vyvolá pro lidské oko zrakový vjem, kterému říkáme barva světla. Viditelné světlo je elektromagnetické vlnění o vlnové délce 390nm až 790nm, nachází se mezi UV zářením a IR zářením. Pro takovéto světlo používáme výraz fotometrie. Metodu měření elektromagnetického záření nazýváme radiometrie. Jednotlivý popis radiometrických a fotometrických veličin je uveden v Tabulce 1. [1]



Obrázek 1 Elektromagnetické spektrum [2]

Světlo můžeme pokládat za energii fotonů. Pro výpočet této energie platí Planckova rovnice

$$E_{ph} = \frac{h \cdot c}{\lambda},$$

kde h je Planckova konstanta a má hodnotu $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, λ je vlnová délka. Vyjadřuje vztah mezi vlnovou délkou a částicovým charakterem, které světlo vykazuje. Důležité je také podotknout, že pro světlo je důležitá jeho rychlost, která se šíří prostorem. Světlo se ve vakuu šíří rychlostí $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V látkovém prostředí má světlo vždy menší rychlost. Šíření světla je ovlivňováno prostředím, kterým prochází. [1], [8]

Existují 3 typy prostředí:

- průhledné – nikterak nedochází k rozptylu světla,
- průsvitné – je částečně rozptylováno,
- neprůhledné – je pohlcováno nebo se odráží.

Radiometrické veličiny	Jednotka	Fotometrické veličiny	Jednotka
Zářivá energie	E_{ph} [J]	Světelný tok	Φ [lm]
Zářivý tok	Φ [W]	Svítivost	I [cd]
Zářivost	I [W/sr]	Jas	L [cd/m ²]
Intenzita vyzařování	M [W/m ²]	Osvětlení	E [lx]

Tabulka 1 Radiometrické a fotometrické veličiny[17]

Zářivá energie je celková energie přenášená elektromagnetickým zářením. *Světelný tok* charakterizuje schopnost zářivého toku vyvolat zrakový vjem.

Zářivý tok udává energii, kterou zdroj vyzáří za 1 sekundu. *Svítivost* vyjadřuje, jak se světelný tok vysílaný zdrojem rozloží do jednotlivých směrů v prostoru.

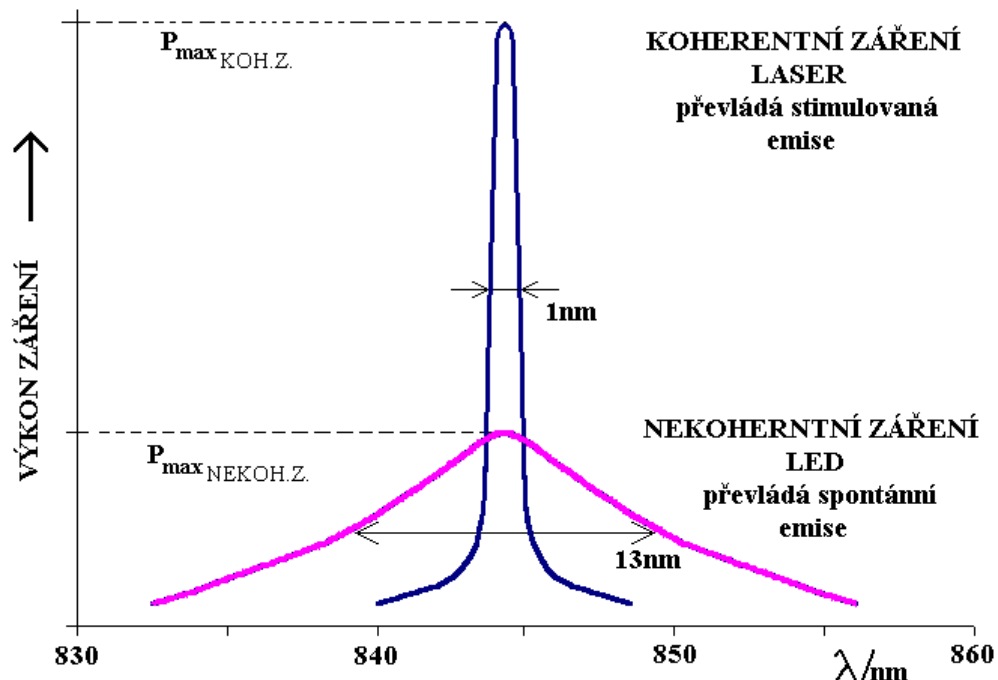
Zářivost se rovná zářivé energii, kterou zdroj vyzáří za 1 sekundu do jednotkového prostorového úhlu. *Jas* je světelný tok do jednotkového prostorového úhlu vztažený na jednotkovou plochu zdroje.

Intenzita vyzařování je číselně rovna zářivému toku vysílaného z plochy zdroje o obsahu 1 m². *Osvětlení* charakterizuje účinky světla na určité ploše. [3], [4], [17],

1.1 Zdroje světla

Za zdroj světla pokládáme každé těleso, v němž světlo vzniká a šíří se dál do prostoru. V dnešní době patří mezi nejdůležitější zdroje hlavně luminiscenční (nekoherentní zdroj záření) a laserové (koherentní zdroj záření) diody. Tyto prvky mají malé rozměry, snadné navázání paprsku na optická vlákna a snadnou modulovatelnost. Hlavními požadavky na optické zdroje světla je vysoká účinnost převodu elektrické

energie na světelnou energii, záření světelného zdroje na vlnové délce do optických oken s co nejmenším útlumem, vysoká životnost a spolehlivost. [6]



Obrázek 2: Luminiscenční diody a laserové diody [5]

Obrázek 2 porovnává luminiscenční a laserové diody. Jak můžeme vidět, laserové diody mají oproti LED diodám o mnoho vyšší výkon záření, ale za to menší rozsah spektra.

1.1.1 Luminiscenční diody

Luminiscenční dioda neboli také LED je v poslední době často používaným zdrojem světla. Důvodem je rozšiřování výroby LED a tím snižování pořizovacích nákladů. Díky neustálému technickému růstu se vyrábí výkonnější LED struktury, které generují více světelné energie. LED je název pro polovodičový PN přechod, který při průchodu elektrického proudu vyzařuje světelné záření. LED dioda je založena na elektroluminiscenčním jevu, čímž rozumíme emisi fotonu z oblasti polovodičového P-N přechodu, kterým prochází proud. Proudová hustota na přechodu ovlivní, kolik elektronů vytvoří světelnou energii a kolik tepelnou. [6], [10]

1.1.2 Laserové diody

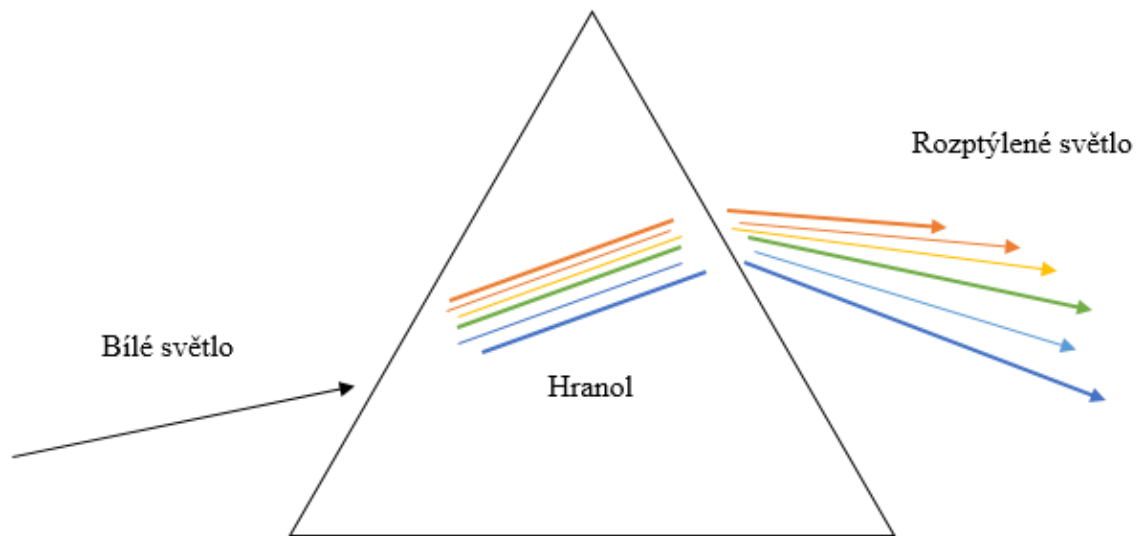
Tyto diody mají oproti LED diodám vyšší vyzařovací výkon s menší šířkou spektra, vysokou účinností vazby na vlákno a výhodou modulace vyšších frekvencí. Nevýhodou je požadavek většího napájení, stabilizace teploty a o něco vyšší ceny. Laserové diody jsou dobře použitelné pro velké vzdálenosti s potřebou vyzařování úzkého svazku a přenášení více vlnových délek. K zesílení světla dochází opakovanými průchody fotonů médii se specifickými vlastnostmi. Základem každého laseru je aktivní prostředí. Jde o medium schopné zesilovat jím procházející záření díky stimulované emisi. Jde o jev, který může nastat při interakci fotonu s atomem nebo molekulou. Světelné záření laserových diod je vhodné pro telekomunikace, protože pokrývá požadovanou vlnovou délku a disponuje úzkou šířkou pásma. [6], [11], [16]

1.2 Šíření světla prostředím

Jak jsem již napsala, šíření světla je závislé na tom, jakým prostředím prochází. Pokud teda světelná vlna prostupuje určitým prostředím, tak světlo i prostředí na sebe vzájemně působí. Toto působení můžeme rozdělit na tři způsoby: rozklad, pohlcování a rozptyl. Útlum u optických vláken můžeme popsat jako ztrátu optického výkonu, způsobený zapojením prvku do optické trasy. [3], [7]

1.2.1 Rozklad světla

Rozklad světla neboli také disperze se uskutečňuje tím, že světlo se šíří částečně i do prostoru za překážkou. Nejvíce se projevuje při přechodu světla přes hranol. Necháme-li přecházet monochromatický svazek světelných paprsků přes hranol, světelné paprsky se při průchodu přes hranol lámou a tudíž lomené světlo již není bílé, ale jeho okraje jsou zbarvené. Na obrázku 3 můžeme vidět, že bílé světlo se při lomu rozložilo na několik barev. Důvodem toho, je ta skutečnost, že rychlost světla v látkovém prostředí závisí na frekvenci světelného vlnění, které určuje barvu světla. [8]



Obrázek 3: Disperze světla

1.2.2 Pohlcování světla

Při průchodu úzkého svazku rovnoběžných světelných paprsků přes látky se intenzita zmenšuje. Toto vzájemné působení světelné vlny s elektrony látky, při které se část světelné energie odevzdává elektronům. Pohlcování neboli absorpci můžeme definovat jako dopad monochromatického záření o vlnové délce λ na dvě prostředí, jistá část se odrazí a zbytek o intenzitě I_0 vniká do druhého prostředí. Pokud se při průchodu do druhého prostředí intenzita I_0 nezmění, jedná se o průhledné prostředí. Zjednodušeně lze říci, že barevným sklem projde jen světlo určitých vlnových délek. Podle Lambertova zákona platí:

$$I = I_0 \tau,$$

kde I značí intenzitu prošlého paprsku, I_0 intenzitu dopadajícího paprsku a τ propustnost.[9]

1.2.3 Rozptyl světla

Při průchodu světla prostředím se elektrony vychylují z rovnovážných poloh a vysílají sekundární vlnění do různých směrů, které neodpovídají směru šíření dopadajícího vlnění. Rozptyl se tedy projevuje odchylováním světla od původního směru a při pohledu ze strany lze spatřit světelný kužel, vytvořený postupujícím svazkem paprsků, tzv.

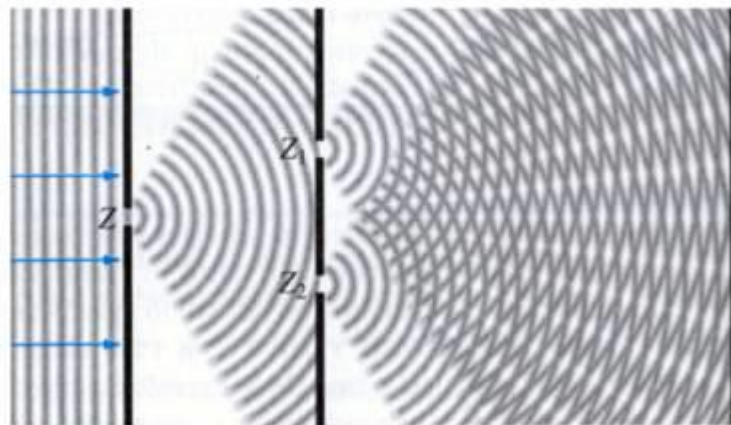
Tyndallův jev (např. sluneční paprsky šířící se oblaky). Ve své podstatě je každý rozptyl světla ohyb na velmi malých shlucích molekul, které bývají menší než vlnová délka světla.

Ukázalo se, že světlo se rozptyluje tím více, čím je krátkovlnnější a jeho intenzita ubývá s rostoucím úhlem rozptylu. Rozptyl se stává dobře pozorovatelným v kalných prostředích (dým, mlha, emulze, suspenze), nebo v tuhých látkách typu mléčného skla. Rozptýlené světlo má namodralou barvu, naopak světlo prošlé bývá žlutočervené. Zvláště u par blízkých zkapalnění je možné spatřit modravou opalescenci, která je způsobena statistickým kolísáním rozložení molekul v prostoru a tímto způsobem vyvolaným ohybem světla, jak vysvětluje anglický fyzik Rayleigh. Tvrdil, že světlo rozptylují přímo molekuly vzduchu a spočetl, že intenzita rozptýleného světla silně závisí na jeho vlnové délce. [6], [9]

1.3 Interference světla

Interference dokazuje vlnové vlastnosti světla. Pozorovatelná interference u světla nastává, pokud je splněna podmínka koherence světelného vlnění. Koherentní jsou taková, která mají stejnou vlnovou délku a jejichž fázový rozdíl je v daném bodě s časem neměnný. Nejlepší variantou pro pozorování interference dochází na velmi tenkých vrstvách. Interferencí jsme schopni vlnění jak zesílit, tak i zeslabit nebo vyrušit.

Rozmach vlnové optiky nastal až začátkem 19. století zásluhou anglického lékaře a fyzika Thomase Younga. Ten v listopadu r. 1801 předvedl v Londýně optické pokusy, při kterých sluneční světlo procházející malým otvorem nechal dopadat na dvojici malých otvorů. Na stínítku za nimi se objevila řada rovnoběžných barevných proužků, jejichž vznik přesvědčivě vysvětlil jako důsledek interference dvou světelných vlnění vycházejících z koherentních světelných zdrojů. [14], [15]



Obrázek 4: Youngův pokus [15]

Za koherentní můžeme považovat záření, které prochází štěrbinami Z_1 a Z_2 v případě, že je jejich vzdálenost velmi malá. Dnes už můžeme využít dalšího zdroje koherentního záření, kterým je laserové záření. Jak můžeme vidět na obrázku 4, na stínítku dochází ke skládání světla. Do každého bodu na stínítku dopadá světlo z obou štěrbin. Dráhový rozdíl Δl drah l_1 a l_2 paprsků dopadajících do téhož bodu, rozhodne, zda na stínítku vznikne světlý nebo tmavý proužek.

Podmínka pro vznik interferenčního maxima:

$$\Delta l = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda,$$

Podmínka pro vznik interferenčního minima:

$$\Delta l = (2k - 1) \frac{\lambda}{2},$$

kde $k = 1, 2, 3, 4, \dots$ se nazývá řád interferenčního minima nebo maxima.

Světlý proužek vznikne, pokud je dráhový rozdíl Δl roven sudému násobku poloviny vlnové délky. Zato tmavý proužek vzniká pouze tehdy, je-li dráhový rozdíl roven lichému násobku poloviny vlnové délky. [1], [9], [15]

1.4 Ohyb světla

K ohybu světla neboli difrakci dochází jen při setkání s překážkou. Je nutno podotknout že, čím užší je štěrbina, tím širší je oblast difrakce. Ohyb světla lze také pozorovat na hraně, štěrbině, difrakční mřížce, nebo kruhovém otvoru. Po dopadu světla na stínítko, lze pozorovat různé rozložení intenzity, jelikož paprsky vystupující např. ze štěrbin všemi směry spolu navzájem interferují. Ohybové mřížky obsahují stovky až tisíce tenkých a hustých rovnoběžných vrypů na milimetr. Jsou charakterizovány mřížkovou

konstantou, což je vzdálenost středů dvou sousedních štěrbin a její převrácena hodnota udává lineární hustotu vrypů. Dopadne-li na mřížku bílé světlo, tvoří se maxima pro různé vlnové délky v různých směrech a v různých vzdálenostech od hlavního maxima nultého řádu, tj. shodného pro všechny vlnové délky, a vzniká tak barevné spektrum. [1], [9]

1.5 Denzitometrie

Denzitometrie je metoda měření optické hustoty materiálů citlivých na světlo. Optická hustota udává, do jaké míry je schopen daný materiál absorbovat světlo. Pro měření optické hustoty se používá denzitr. Je složen ze světelného zdroje, zařízení, kde je umístěn materiál například filtr, fotodetektoru, popřípadě i zesilovače a detektoru naměřené optické hustoty. U propustného materiálu měří denzitr množství prošlého světla a u nepropustných materiálů měří množství odraženého světla. Pro výpočet optické hustoty používáme tento vzorec

$$D = \log T,$$

kde D je hustota a T je transmitance neboli propustnost, tedy množství světla určité vlnové délky, které prošlo vzorkem. Transmitance je definována: $T = \frac{I}{I_0}$,

kde I je intenzita světla, která prošla vzorkem a I_0 je intenzita světla, které do vzorku vstoupilo. [17]

1.6 Detekce záření

K tomu, abychom detekovali záření, nám slouží detektory. Hlavní funkcí optického detektoru je účinně převést malé množství energie světla přijaté z vlákna, jako fotony, na elektrické signály. Detektor musí zahrnovat odpovídající zesílení pro generování výstupního signálu ze vstupů na nízké úrovni. Používají se dva hlavní typy detektorů pro detekci světla.

Mezi základními parametry, které jsou určující pro výběr fotodetektoru, patří nejvyšší přenášený kmitočet, úroveň přenášeného signálu a velikost šumu na výstupu fotodetektoru. [13], [18]

1.6.1 PIN fotodiody

Fotodiody převádí optické signály přímo na elektrické signály. Foton, který vstupuje do polovodiče s dostatečnou energií, může být absorbován, přičemž vzniklý volný elektron a díra vytváří v polovodiči napětí (fotovoltaický jev) nebo zvětšují jeho vodivost (fotovodivostní jev). Fotodiody PIN jsou velmi rozšířené detektory záření, které mají vysoký kvantový výtěžek (60 – 80%) a rychlou odezvu. Na vlnových délkách, kde je možné použít jak Si, tak Ge diody, je výhodné dát přednost křemíkovým diodám, neboť tyto jsou teplotně méně závislé a mají menší proud za tmy. Šířka vnitřní vrstvy zajišťuje vysokou pravděpodobnost, že jsou přichozí fotony absorbovány v p nebo n oblasti. [4], [13], [18]

1.6.2 Lavinové fotodiody

Lavinové fotodiody jsou polovodičové součástky využívající vnitřního fotoelektrického jevu, kdy po dopadu fotonu dochází k vytvoření páru elektron-díra. Dioda je zapojena v závěrném směru na takové napětí, že elektron uvolněný po dopadu fotonu uvolní lavinovitě další. Aby nedošlo ke spálení diody, je k ní připojený zhasací okruh, který po spuštění lavinového efektu zvyšuje napětí nad kritickou hodnotu. Lavinové fotodiody vyžadují stabilní vysokého napětí napájení a složitější zapojení. To zvyšuje náklady a snižuje spolehlivost. Lavinové fotodiody jsou obvykle méně spolehlivé než standardní PIN diody. Z toho vyplývá, že PIN diody jsou obecně preferované zařízení pro běžné aplikace. Lavinové diody poskytují zvýšenou citlivost 5 až 10 dB. [4], [18]

1.7 Typy detektorů

Téměř všechny detektory, které přijímají fotony a produkují elektrickou reakci, mohou být zesilovány a přeměňovány do formy, srozumitelné a pochopitelné pro člověka.

Existují tři základní typy detektorů:

- fotonové detektory – reagují na jednotlivé fotony. Absorbované fotony uvolňují jeden nebo více nosičů náboje v detektoru a mohou modulovat elektrický proud v materiálu nebo mohou projít přímo k výstupnímu zesilovači nebo může dojít k chemickým změnám. Tyto detektory se používají pro ultrafialové, viditelné a infračervené záření, ale také se využívají v oblasti medicíny. Zdárným příkladem je rentgen,

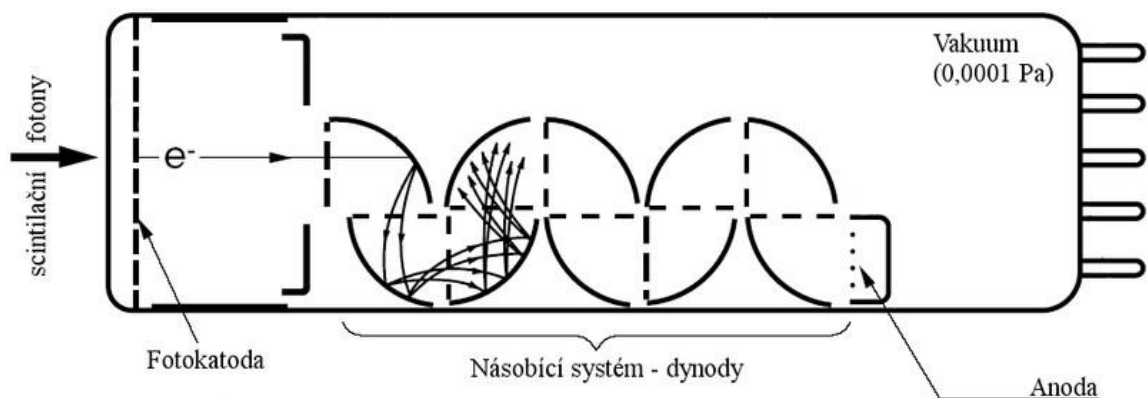
- tepelné detektory – absorbují fotony. Ve většině případů energie mění elektrické vlastnosti materiálu detektoru,
- koherentní detektory – reagují na změnu velikosti elektrického pole signálu a umožňují určit fázi dopadajících fotonů. [4]

2 METODY ZPRACOVÁNÍ SLABÝCH OPTICKÝCH SIGNÁLŮ

Existuje nepřehledné množství metod a detektorů pro zpracování slabých optických signálů. Každá z nich je založena na různých fyzikálních principech. V této kapitole budou popsány jednotlivé metody zpracování slabých optických toků záření. [10], [31]

2.1 Detekce s fotonásobičem

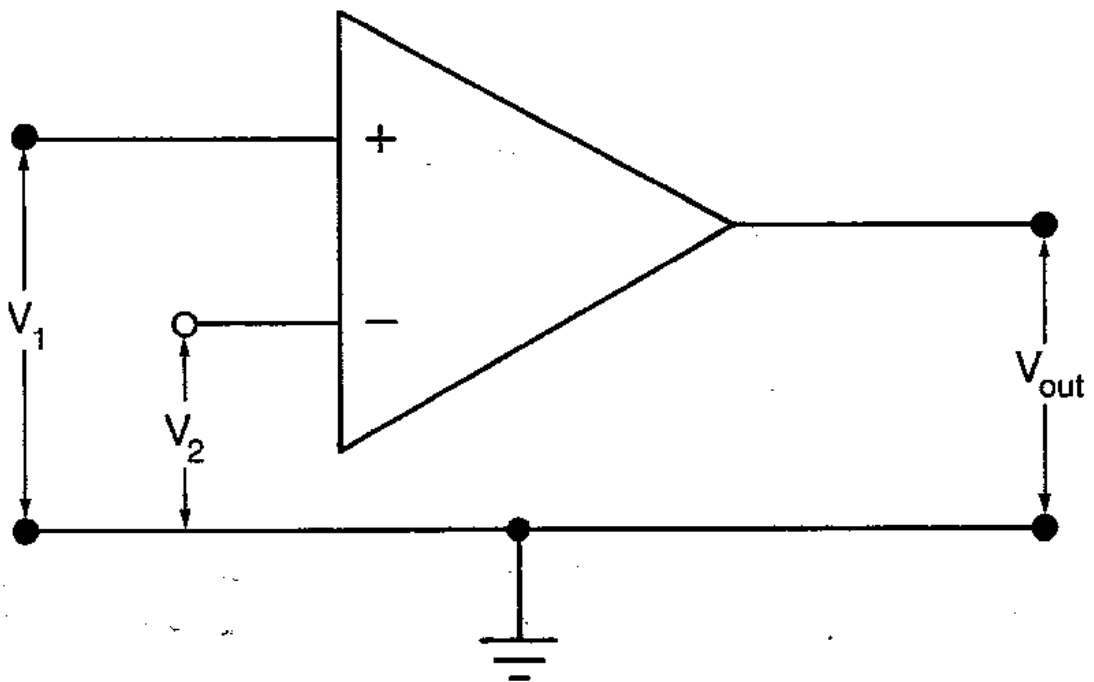
Fotonásobič (PMT) je zařízení, které zajišťuje velmi rychlou odezvu a má extrémně vysokou citlivost. Tyto detektory se využívají především pro měření velmi slabých optických signálů. Každý fotonásobič se skládá z katody, z několika dynod a anody. Když světlo vstoupí fotokatodou, fotokatoda emituje fotoelektrony do vakua. Tyto fotoelektrony jsou poté urychlovány prostřednictvím elektrického napětí mezi jednotlivými dynodami. Dopad těchto urychlených fotoelektronů, vyvolává takzvané sekundární emise, jejímž výsledkem je znásobení počtu těchto elektronů. Sekundární emise nastává tehdy, dopadnou-li elektrony vhodnou rychlostí na povrch materiálu. Nárazem těchto částic jsou z povrchu vyzářeny elektrony. Tyto znásobené elektrony poté dopadají na anodu. Díky těmto sekundárním emisím poskytují fotonásobiče extrémně vysokou citlivost a nízký šum. Z důvodu nízkého šumu jsou fotonásobiče používány pro aplikace, kde je třeba vysokého zesílení. Fotonásobiče mají ale i některé nevýhody – jsou poměrně nákladné, vyžadují velké záporné napětíové předpětí, často je nutné je chránit před přebuzením a jsou poměrně rozměrné. [10], [20], [32]



Obrázek 5: Princip fotonásobiče [19]

2.2 Detekce s operačními zesilovači

Operační zesilovače dále jen „OZ“ vznikly jako složité elektronické obvody pro náročné použití při zpracování analogových stejnosměrných a nízkofrekvenčních střídavých signálů v analogových počítačích. Vzhledem k neustálému posunu technologií, bylo umožněno vytvoření jednodušších OZ. Ty jsou odolné proti přetížení a umožňují jednoduše realizovat nejrůznější elektronická zařízení. To mělo za následek velké rozšíření nejen v průmyslové, ale i spotřební elektronice. Detektory s napěťovými zesilovači mají vysokou vstupní impedanci a používají se pro zesilování signálů z napěťových optických detektorů. V případě, že má výstup detektoru proudový charakter, je možné převést tento signál přes převodní impedanci. Vysoká převodní impedance snižuje Johnsonův šum, ale snižuje také dostupnou šířku pásma napěťového zesilovače. Mezi tyto zesilovače patří také zesilovače s nízkým ofsetem „chopper“, které zaručují velmi nízký vstupní ofsetový proud s malým driftem. [4], [10], [24], [33]



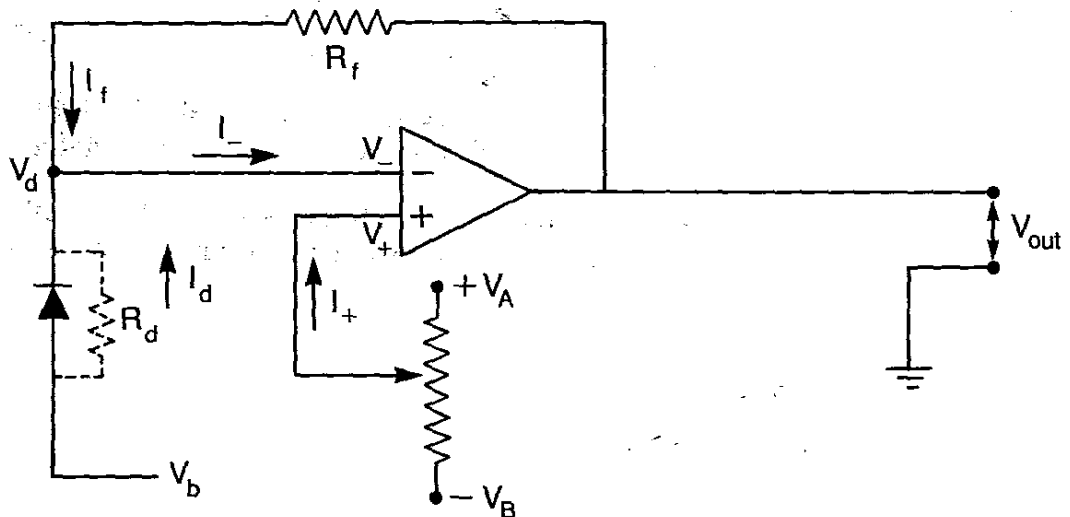
Obrázek 6: Schéma operačního zesilovače [4]

Na obrázku 6 je znázorněno schéma operačního zesilovače, kde výstupní napětí V_{out} je přímo úměrné rozdílu mezi dvěma vstupními napětími V_1 a V_2 .

2.3 Detekce s transimpedančními zesilovači

Jestliže signál, který vychází z detektoru je proudového charakteru, je vhodné použít transimpedanční zesilovač. Rozdíl mezi operačním a transimpedančním zesilovačem je v jeho vstupních svorkách. Neinvertující svorka je napěťová, kdežto invertující je proudová. Tudíž můžeme říci, že zesilovač pracuje ve smíšeném módu.

Detektor je připojen na invertující vstupní svorku a výstup operačního zesilovače je připojen na stejný vstup, přes zpětnovazební rezistor. Výstup operačního zesilovače je úměrný rozdílu vstupního napětí. Výsledné charakteristiky transimpedančního zesilovače jsou závislé na použitém zesilovači a zpětnovazebním odporu. Vysoký odpor pro vysoké zesílení však snižuje šířku pásma, ale zaručuje nízký Johnsonův šum. [4], [10], [33]



Obrázek 7: Schéma transimpedančního zesilovače s fotodiodou. [4]

2.4 Metody optické detekce dle modulace

Metody optické detekce můžeme rozdělit na modulované a demodulované. U demodulovaných metod je nutno zapojit detektor záření, který převádí optické záření zpět na elektrický signál. Značným problémem demodulovaných metod je jejich značné zatížení nízkofrekvenčním šumem a nemožnost oddělení měřeného a interferujícího signálu jinak než fyzickým zabráněním dopadu tohoto interferujícího signálu na detektor. Tato metoda není vhodná pro měření slabých optických signálů.

U modulovaných metod je optický zdroj vhodně modulován a výstupní signál je měřen na modulačním kmitočtu, který je volen do oblasti vně nízkofrekvenčního šumu.

Mezi modulované metody měření optického signálu patří spínaná integrace, čítání fotonů, Lock-In metoda, které budou popsány níže. [10]

2.4.1 Metoda spínané integrace

Metoda spínané integrace je založena na měření integrálu časového průběhu signálu a je typicky použita pro měření modulovaných laserových signálů. Šumové vlastnosti této metody závisí na šířce integračního okna. Krátká okna mají velkou šířku pásma a více šumu. Z tohoto ohledu by bylo vhodné použití delšího integračního okna, ale v případě, že časové trvání nenulových hodnot signálu bude kratší než integrační okno, se poměr signálu k šumu nezlepší. Metoda spínané integrace se chová také jako filtr, protože výstup je úměrný integrálu časového průběhu signálu během otevřeného integračního okna, tak lze účinně potlačit kmitočtové složky signálu s periodou rovnou délce integračního okna a jeho celočíselným dělencům, protože integrál těchto příspěvků je během okna nulový. Dále je možné potlačit interferující kmitočtové složky signálu, je-li kmitočet modulačního signálu roven kmitočtu interferujícího signálu anebo jeho celočíselným násobkům, neboť tento interferující signál vytvoří pouze stejnosměrnou nesymetrii na výstupu spínaného integrátoru. Tato metoda je vhodná pro signály s velmi nízkou střídou optického signálu. [10]

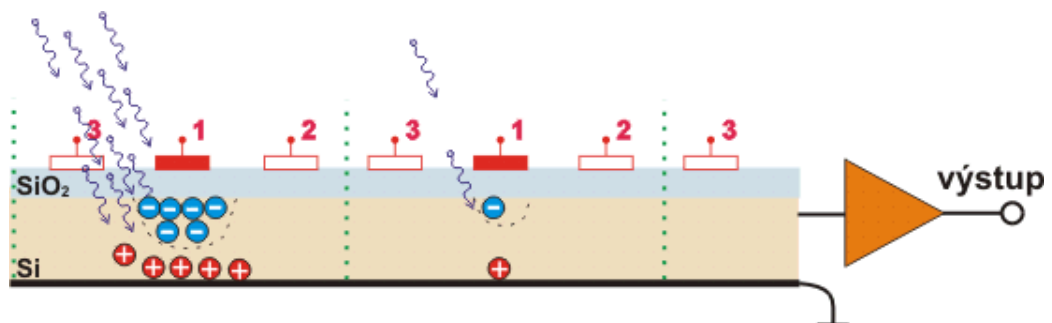
2.4.2 Metoda čítání fotonů

Uplatnění přístrojů pro počítání fotonů měly rozhodující vliv na pokrok v širokém spektru oborů, od astronomie a metalurgii k ochraně životního prostředí, zdravotní diagnostiku, lékařské analýzy a zobrazování, a v neposlední řadě i v biomedicíně výzkumu.

Existují tři typy zařízení pro nejpokročilejší počítání fotonů:

- **Single Photon Counting modul (SPCM)** – je počítání fotonů s lavinovou fotodiodou (APD). APD je pevné zařízení na bázi silikonu, který převádí fotony do elektronů jinak, než obyčejné fotodiody. V běžných fotodiodách je poměr elektron / foton 1:1. V APD však tyto fotony generované elektrony mohou excitovat více elektronů, který vytváří lavinový efekt. U měření slabých optických signálů popisujeme světlo jako sled jednotlivých fotonů.

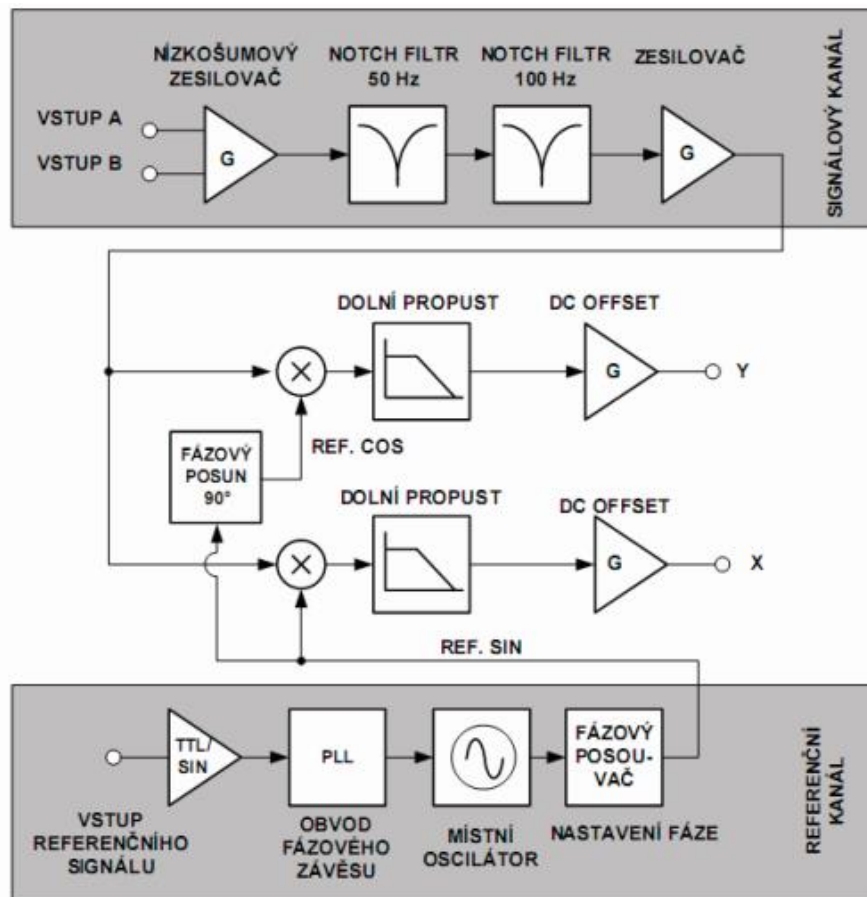
- **Kanálový fotonásobič (CPM)** - fotony vstupující do CPM a produkují elektrony, které jsou urychlovány směrem k anodě. Fotony vstupující do CPM produkují elektrony, které jsou urychlovány směrem k anodě přes multi-zakřivený, polovodičový vakuový kanál. Vzhledem k tomu, že CPM funguje v podstatě na stejném principu jako PMT, má několik výhod. Například jsou méně ovlivněna vnějšími magnetickými poli a jsou odolnější proti rozbití. Kromě toho jsou tyto přístroje extrémně rychlé. Fotony mohou být počítány každých 30 nanosekund.
- **CCD snímač** – jedná se o fotocitlivou polovodičovou součástku. CCD snímač je založen na vnitřním fotoelektrickém jevu, kde z látek jsou uvolňovány elektrony jako důsledek dopadajícího elektromagnetického záření. Ačkoliv CCD nejsou speciálně navrženy pro počítání fotonů, mohou vykonávat tuto funkci. Na rozdíl od SPCM a CPM, které detekují fotony jako jeden prvek najednou, jeden CCD poskytuje informace z více obrazových bodů najednou. CCD je zařízení, které absorbuje světlo vstup a převádí jej na výstupní elektronický signál. [10], [19], [20]



Obrázek 8: Funkce CCD snímače [20]

Na obrázku 8 je znázorněno, jak CCD snímač funguje. Uvolněné elektrony je možno z polovodičů odvést pomocí přiložených elektrod. Elektrody jsou od polovodičů izolovány velmi tenkou vrstvou oxidu křemičitého (SiO_2), který se chová jako dokonalý elektrický izolant, takže uvolněné elektrony pomocí fotoelektrického jevu nemohou být odvedeny pryč. Na elektrody se přivede kladné napětí a na CCD se nechá působit světlo. Dopadající fotony v polovodiči uvolňují elektrony, které jsou pak přitahovány ke kladně nabitým elektrodám. Po elektronech zůstanou v polovodiči tzv. díry, které vůči svému okolí vykazují kladný náboj a ty jsou naopak přitahovány elektrodou na spodní části CCD. [20]

2.4.3 Metoda Lock-In



Obrázek 9: Blokové schéma Lock-In zesilovače [21]

Lock-In je přesné zařízení se kterým lze měřit slabé napěťové či proudové signály. Umožňuje měřit napětí v nanovoltech. Tato metoda se využívá především pro měření velmi slabých optických signálů. Samotný optický signál je obvykle detekován pomocí transimpedančního zesilovače a je modulován referenčním kmitočtem. Vstupní impedance je $10\text{ M}\Omega$. Vstupy mohou být také konfigurovány pro měření s volitelným rozsahem proudu od 10^6 a 10^8 V/A . Lock –In zesilovače se liší od svých analogových protějšků. Ačkoli oba typy Lock- In mají nízký šum a síťové filtry, jejich podobnost zde končí. [10], [21], [22], [37]

2.5 Šum

Vzhledem k tomu, že signály procházejí komunikačním kanálem atomových částic a molekul v přenosovém médiu, mohou vibrovat a vydávat náhodné elektromagnetické signály, jako je šum. Jestliže je procházející signál zmírněn, může se jeho úroveň blížit

šumu. Důležitým parametrem kanálu je poměr síly přijímaného signálu (S) na síle signálu šumu (N). Poměr S / N se nazývá poměr signálu k šumu, který je normálně exprimován v decibelech dB. Platí vztah:

$$S / N = 10 \log_{10} (S / N) \text{ dB}$$

kde:

S = signál výkonu ve wattech

N = šum výkonu ve wattech

Vysoký poměr signálu k šumu znamená, že síla signálu je vysoká v porovnání s šumem, což má za následek dobrý příjem kvality signálu.

Aby bylo měření co nejpřesnější, vždy musíme počítat s šumem, rušením a zkreslením. Šum nelze nikdy zcela odstranit, ale lze jej minimalizovat. Šum se vyskytuje snad u všech fyzikálních veličin. [22], [23]

2.5.1 Johnsonův šum

Johnsonův šum je velmi často nazýván také jako tepelný šum. Termický šum není závislý na velikosti protékajícího proudu rezistorem ani na velikosti přiloženého napětí. Nejprve je však zřetelný šum samotného rezistoru. Jeho zdrojem je jakýkoli odpor. Pro tento šum platí vztah:

$$I_j^2 = \frac{4kTdf}{R},$$

kde

I_j je proud Johnsonova šumu,

K je Boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}^{-1}$),

T je teplota v kelvinech,

df . šířka kmitočtového pásma, v němž se šum měří,

R je odpor. [23], [25]

2.5.2 Shot šum

Neboli také výstřelový šum se vyskytuje u všech součástek, kde se využívá přechodu PN. Objevil jej a matematicky odvodil Walter Schottky v roce 1918, podle kterého je tento šum dán vztahem:

$$I_{noise} = \sqrt{2eI\Delta f},$$

kde

I_{noise} je napěťový šum,

e je elementární náboj elektronu ($1,602 \cdot 10^{-19} \cdot C$),

I je proud,

Δf je šířka pásma.

Zjednodušeně lze říci, že vzniká z nestejnomyšnosti v elektronovém toku, který generuje šum v podobě proudu. [23], [25]

2.5.3 Blikavý šum

Blikavý šum neboli také Flicker Noise uplatňuje se na nízkých kmitočtech. To se vyskytuje téměř ve všech elektronických zařízeních. Tento šum je způsoben poruchami v krystalové mřížce, kde jsou procházející náboje náhodně zachytávány a uvolňovány a jeho hustota klesá s rostoucím kmitočtem. Proto je někdy také označován jako šum $1/f$. Na kmitočtech vyšších než 1 kHz je spektrální hustota nižší. Je důležitý pro diagnostiku polovodičových prvků. Ten je spojen se záchytem volných nosičů náboje na hladinách uvnitř zakázaného pásu. Přítomnost hladin je výrazně ovlivněna jevy na povrchu polovodičového substrátu, především plazivými proudy. [23]. [24], [25]

3 APLIKACE METOD ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU V OBLASTI BEZPEČNOSTNÍCH TECHNOLOGIÍ

3.1 Ionizující záření

Jedná se o záření, jehož kvanta mají velmi vysokou energii a jsou schopna excitovat atomy nebo molekuly ozářených látek. To znamená, že je předána energie záření elektronů atomu látky a ty se poté přesunou na vyšší energetickou hladinu. Takovýto stav není trvalý, elektron se po nějaké době vrátí na původní energetickou hladinu, přičemž rozdíl energií těchto hladin se vyzáří pomocí kvanta fotonu. Při procesu ionizace tato kvanta částic vyřázejí elektrony z elektronových obalů atomů, a tím se z elektricky neutrálních atomů nebo molekul stávají elektricky nabitě částice – ionty. [26], [27], [35]

3.2 Detekce ionizujícího záření

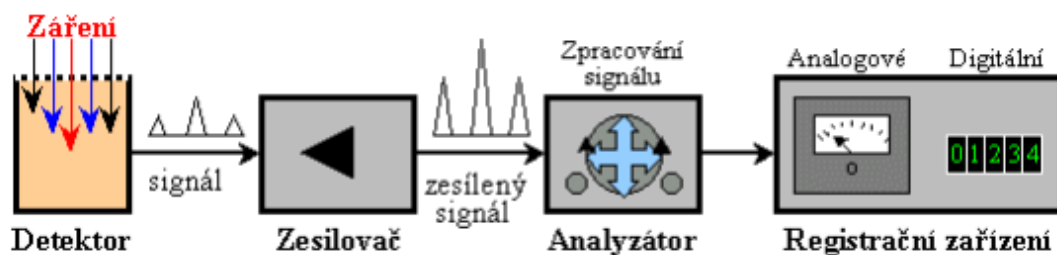
Jak již víme, ionizující záření je okem neviditelné, a tak abychom s ním mohli pracovat, je nutné ho detekovat pomocí fyzikálních metod a vhodných přístrojů k detekci tohoto záření. Z důvodu neustálého růstu ve fyzice existuje nespočet detektorů ionizujícího záření a různé typy detektorů budou v této kapitole popsány. [26], [27]

3.2.1 Typy detektorů podle principu detekce

- **fotografické detektory** jsou závisle na fotochemickém účinku záření založeny na fotochemických účincích záření nebo využívají fotografické zobrazení stop částic v určitém prostředí. Jestliže pronikne do fotografického materiálu ionizující záření, které obsahuje halogenidy stříbra, dochází k tzv. fotochemické reakci. Za fotochemickou reakci považujeme jakoukoli reakci, která je vyvolána dopadem světla či jiného záření. Vhodným příkladem pro fotochemickou reakci je fotosyntéza u rostlin. Mezi fotografické detektory patří především filmové dozimetry, rtg filmy,
- **materiálové detektory** jsou další detektory, které jsou schopné detekovat ionizující záření. Vzhledem k nízké citlivosti jsou použitelné pouze pro vysoké intenzity záření. Materiálové detektory využívají dlouhodobější změny vlastností určitých látek (barva, složení) působením ionizujícího záření. Do této kategorie spadají např. stopové detektory, založené na tom, že po dopadu částic dochází k drobným

lokálním poruchám v krystalové mřížce určitých materiálů (např. slídy, speciální skla),

- **elektronické detektory** jsou další skupinou. Principem těchto detektorů je, že absorbované energie ionizačního záření se převádí na elektrické proudy nebo impulsy, které se zesilují a vyhodnocují v elektronických aparaturách. Do této kategorie spadají ionizační komory, scintilační detektory, polovodičové detektory. [36]



Obrázek 10: Blokové schéma elektronického detektoru [27]

3.2.2 Typy detektorů dle komplexnosti měřené informace

Mezi detektory udávající intenzitu záření patří např. filmové a termoluminiscenční dozimetry, ionizační komory. Na rozdíl od předchozích detektorů měří spektrometry ionizujícího záření nejen intenzitu či počet kvant záření, ale i energii kvant záření a příp. jeho další charakteristiky. Do této skupiny patří zejména scintilační detektory, polovodičové detektory, magnetické spektrometry. [26], [27], [34]

3.3 Luminiscenční metody

Luminiscence je definována jako přebytek světelného záření nad úroveň tepelného vyzařování v případě určité doby doznívání záření. Luminiscence může vznikat při nízkých teplotách. Zásadními charakteristikami jsou tedy dlouhá, ale konečná doba trvání.

3.3.1 Rozdělení luminiscence

U luminiscence může dojít k těmto případům:

- **fosforescence** – nastává tehdy, když využíváme při vyzařování signálu z vybuzeného elektronového stavu nestabilní hladinu. Pokud po odstranění zdroje záření luminiscence nevyhazí, jedná se o fosforescenci. Ta má obvykle delší dobu dohasínání než fluorescence,

- **fluorescence** - nastává tehdy, když dojde k emisi záření z vybuzeného elektronového stavu jedním nebo více samovolnými energetickými přechody. Pokud po odstranění zdroje záření látky luminiscence vymizí, jedná se o fluorescenci. [26], [27]

3.4 Elektroluminiscence

Elektroluminiscenci chápeme jako přímou přeměnu elektrické energie na světlo. K tomuto fyzikálnímu jevu dochází tehdy, ocitne-li se speciální elektroluminiscenční materiál v elektrickém poli. Elektroluminiscence je fyzikální děj, při kterém dochází k vyzařování světelného signálu při průchodu elektrického proudu polovodičovým přechodem. Laicky můžeme říci, že jde o přímou přeměnu elektrické energie na světlo. Princip detekce poruch a rozložení proudu spočívá v rozlišení světlých a tmavých míst. Ideální solární článek se vyznačuje stejnou proudovou hustotou v celé ploše přechodu. Místa s nižší intenzitou světla signalizují poruchu ve struktuře materiálu. Naopak světlá místa představují oblasti s vyšší proudovou hustotou. [26], [27]

3.5 Fotoluminiscence

Fotoluminiscence je druh luminiscence vyvolaný energií dopadajícího elektromagnetického záření. Řídí se Stokesovým zákonem, podle něhož má vybuzené světelné záření vždy větší vlnovou délku než budící záření. Z tohoto důvodu lze luminiscenci vyvolat jen velmi zřídka viditelným světlem, obvykle je třeba použít ultrafialové nebo rentgenové záření. Jev fotoluminiscence je také závislý na teplotě. [26], [27]

3.6 Infračervené závory

Tak jako většina detektorů, tak i infračervená závora se skládá z aktivní a pasivní části, tedy vysílače a přijímače. Vysílač vytváří infračervený paprsek, který je pomocí optiky směřován k přijímači, kde je zpracován. Jakmile dojde k přerušení paprsku, je vyvolán poplachový stav. Součástí vysílačů jsou modulátory, které modulují světelný tok, aby šířka vlastních pulzů byla úzká a amplituda malá. Podle výrobce a typu se řádově pohybuje v jednotkách, až desítkách mikrosekund, a mezera mezi jednotlivými pulzy se pohybuje v jednotkách milisekund. Díky tomu jsou infrazávory chráněny proti oklamání

jiným infračerveným zářením. Pokusí-li se někdo oklamat přijímač jiným zdrojem IR záření, jehož modulace neodpovídá modulaci vlastního vysílače, reaguje vyhodnocovací zařízení vyhlášením sabotážního poplachu. Bezpečný a prakticky použitelný dosah těchto infračervených závor je od 20 do 80 m. [30]

3.7 Infračervené bariéry

IRbariéry se skládají z několika IRzávor, které jsou umístěny nad sebou. Paprsek vysílače nemusí vždy směřovat vodorovně do přijímače, ale pro větší odolnost proti překonání může paprsek z vysílače do přijímače směřovat pod různým úhlem. Tedy lze říci, že jednotlivé IR paprsky se mohou vzájemně křížit. Nevýhodou tohoto typu infrabariér je pracná montáž a vlastní nastavení, které vyžaduje poměrně velkou trpělivost a praxi. U tohoto typu bariér je nutné provádět kontrolu, zda splňuje správnou funkci.

IRzávory a IRbariéry je možné používat jak pro plášťovou, tak i předmětovou ochranu. V další kapitole bude popsána IR záclona, která se liší od těchto dvou tím, že paprsek směřuje vertikálním směrem. [30]

3.8 Infračervené záclony

Skládají se z aktivní a pasivní části. Záclona je tedy tvořena dvěma naproti sobě ležícími lištami, kde jsou umístěny vysílače a přijímače. Tyto vysílače a přijímače mohou být umístěny v lištách střídavě. IRzáclona vyzařuje kódované impulzy o vlnové délce infračerveného světla cca 880 nm, vysílané z většího počtu vysílacích prvků, které jsou rozmístěny tak, aby vznikla plocha vytvořená souborem mnoha infračervených paprsků. Vyzařované IR paprsky z vysílacích prvků dopadnou na odraznou lištu. Ty vyhodnocují jen signály odpovídající příslušnému kódování. Tak je vytvořena střežená plocha typu sítě. Vnikne-li do této střežené plochy nějaký předmět, změní se parametry infračerveného pole, čímž dojde k vyhlášení poplachu. [30]

3.9 Aktivní infračervené detektory

Aktivní infračervený detektor se používá především ve vnitřních prostorách, jako jsou banky. Principem jeho činnosti je vysílání kódovaných paprsků v blízkém infračerveném pásmu a příjem jejich odrazu následná digitalizace a vyhodnocení signálu. Oproti kamerovým systémům nelze tento AIR detektor oklamat například fotografií,

protože pracuje na principu porovnávání do paměti uložené reflexní struktury hlídaného prostoru, se strukturou v době zapnutí detektoru do aktivního stavu. Jestliže však chceme mít více čidel v jednom prostoru, je nutné, aby byly detektory vybaveny zařízením pro synchronizaci a nedocházelo tak k rušení mezi sebou. Také je možné AIR detektor používat v místnostech kde nutná velká bezpečnost. Funguje tak, že je schopen zjistit současný stav a porovnat jej se stavem první instalace. Vzhledem k tomu, že je odolný vůči falešným poplachům, tyto detektory se využívají, tam, kde jiné selhávají. Například PIR detektor není schopen snímat pohyb za sklem na rozdíl od AIR detektoru. Jejich předností je to, že nepoškozují obrazová plátna ani předměty. Avšak jejich infračervené záření lze identifikovat infravizory. [30]

3.10 Laserové závory

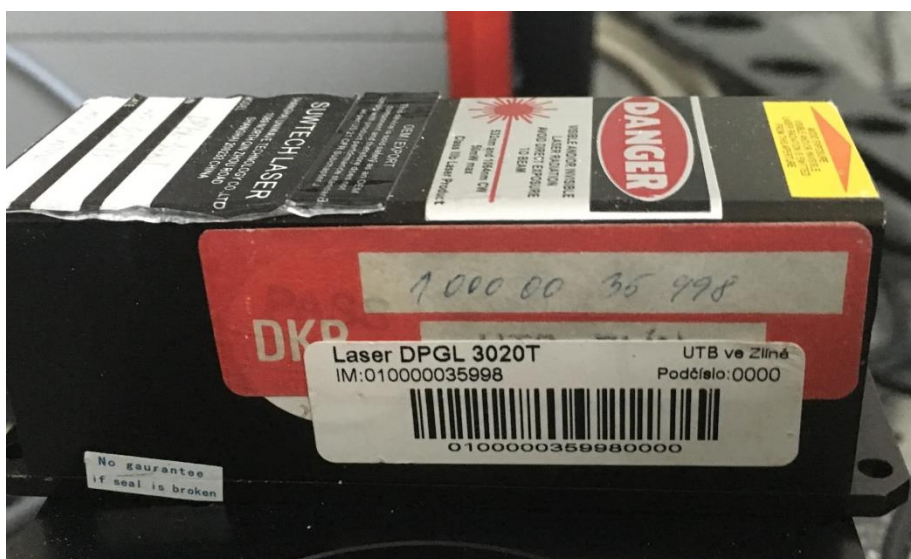
Laserové závory jsou považovány za moderní systémy v oblasti obvodové ochrany. Fungují na obdobném principu jako předchozí závory a bariéry. Systém je tvořen vysílačem a přijímačem, který vyhodnocuje a signalizuje přerušení neviditelného laserového svazku, vlnové délky 850 nm vycházejícího z vysílače. U výstupního výkonu vysílače nemusíme mít strach o zasažení paprsku do očí. Značná rezerva citlivosti spolu s použitou modulací přenosového kanálu umožňuje jak bezporuchový provoz za zhoršených podmínek vnějších vlivů jako je mlha, sníh, prach déšť a podobně, tak i necitlivost přijímače na jakékoliv cizí zdroje světla. V případě přerušení laserového svazku na krátkou dobu v jednotkách milisekund, jsou systémem eliminovány a nevyvolávají poplach. Eliminace je provedena na základě vyhodnocení doby přerušení efektivního rovnoběžného svazku. Nevýhodou těchto laserových závor je krátký dosah 1 km. Tento se používá především ve vnějším prostředí k zabezpečení cest a jiných prostorů proti nežádoucímu vniknutí nepovolaných osob nebo vozidel. Pro zvýšení pravděpodobnosti detekce narušitele, lze systém používat i jako laserová bariéra, tzn. umístění dvou a více závor nad sebou. [30]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 SEZNÁMENÍ SE S EXPERIMENTÁLNÍM ZAŘÍZENÍM

Praktická část se bude zabývat sestavením experimentální aparatury zavedením jednotlivých zařízení do obvodu. Z naměřených hodnot budou vytvořeny grafy a také navržené řešení ke zlepšení funkčnosti a také k využití pro PKB. Avšak před samotným měřením je velmi důležité seznámit se s použitým experimentálním zařízením a jeho funkčními vlastnostmi.

4.1 Laser



Obrázek 11: Laser DPGL 3020T

V laboratořích byl použit laserem DPGL 3020T. Jedná se o zelený laser, jehož vlnová délka je 532nm, který prostupuje přes filtry na fotodiodu. Laser je optickým zdrojem v diplomové práci. S použitím laseru je možné se setkat ve všech oborech lidské činnosti. Neustále vzrůstá rozvoj i investice vkládané do samotného laseru.

LASER DPGL 3020	
Vlnová délka	532nm
Výkon	22mW
Proud	650mA
Napětí	2,5V
Skladovací teplota	-20°C až +60°C
Hmotnost laseru	120g
Warm up Time	10 min

Tabulka 2: Technické parametry laseru DPGL 3020T [28]

V Tabulce 2 jsou znázorněny technické parametry laseru, které uvádí výrobce. Jak je možno vidět v tabulce výkon laseru je 22mW, avšak mnou naměřená hodnota prostřednictvím měřiče výkonu od firmy Ophir je 32mW.

4.2 Laserový měřič výkonu

Výkon laseru byl měřený prostřednictvím tepelného laserového přijímače a přístroje pro zobrazení hodnoty výkonu. Laserový paprsek byl nasměrován na tepelný laserový přijímač a po pěti minutách se zapisovaly hodnoty výkonu. Bylo naměřeno celkem pět hodnot a výkon se zásadním způsobem neměnil. Zařízení pro toto měření bylo používáno firmy Ophir, která se specializuje na infračervenou optiku a fotoniku a je světovou jedničkou na trhu. Byla založena v roce 1976 a vyrábí vysoce kvalitní výrobky založené na nejmodernějších technologiích, které jsou známé svou kvalitou a spolehlivostí. [29]



Obrázek 12: Měřič výkonu laseru

Vega je nejvšestrannější a nejsostikovanější ruční laserový měřič výkonu nebo energie na trhu. Toto zařízení je kompatibilní jak s tepelnými, pyroelektrickými tak i s fotodiodovými senzory od firmy Ophir. V tomto případě byl napojen na tepelný snímač, který je vidět na obrázku 12. Jeho hlavními přednostmi je velmi nízký šum a drift k měření.

4.3 Optický chopper



Obrázek 13: Drážkované kolo

Optický chopper se skládá z ovládací konzole, motorové hlavy a děrovaného kola. Umožňuje nastavení otáček motoru a frekvence referenčního signálu. Rotační chopper se používá k získání referenčního signálu, když projde a přeruší dráhu paprsku. Chopper může být synchronizován s externími referenčními signály a referenčními zdroji, jako například Lock in zesilovače DSP.



Obrázek 14: Chopper

Zjednodušeně lze říci, že chopper je děrovaný kotouček, který se otáčí určitou námi zvolenou rychlostí, která je převedena na frekvenci. V tomto případě byla na displeji nastavena frekvenci 163 Hz.

4.4 Optické filtry



Obrázek 15: Šedý filtr

Záření laseru bylo namodulováno přes chopper a procházelo přes filtry na diodu. Na obrázku 15 je zobrazen jeden ze dvanácti filtrů. Filtr č. 3 byl konstantní z důvodu přebuzení, a k němu byly přidávány další filtry s různou tloušťkou. Pomocí šedého filtru dochází k zeslabení zářivého toku o konstantní útlumový faktor definovaný stupněm šedosti filtru. Celkem bylo k dispozici 12 filtrů od čísla 3 až po 14 a na jednotlivých filtrech byl měřen výstupní signál a pomocí něj poté vypočítána optická hustota.

4.5 Předzesilovač



Obrázek 16: Předzesilovač SR560

SR560 je vysoce výkonný nízko šumový předzesilovač který je ideální pro širokou škálu aplikací, včetně nízké měření teploty a optické detekce. Předzesilovač je často umístěn v blízkosti snímače pro snížení účinků hluku a rušení. Nízko šumový zesilovač je elektronický zesilovač, který zesiluje velmi nízký signál, aniž by výrazně snižoval poměr signálu a šumu. Zesilovač zvyšuje výkon jak signálu tak i přítomnost šumu na jeho vstupu. Nízko šumové zesilovače jsou navrženy tak, aby se minimalizoval další šum.

Parametry přístroje:	
Vstupní šum:	4nV $\sqrt{\text{HZ}}$
Šířka pásma:	1MHz
Vazba AC nebo DC	
vstupní impedance:	100M Ω

Tabulka 3:Technické parametry předzesilovače

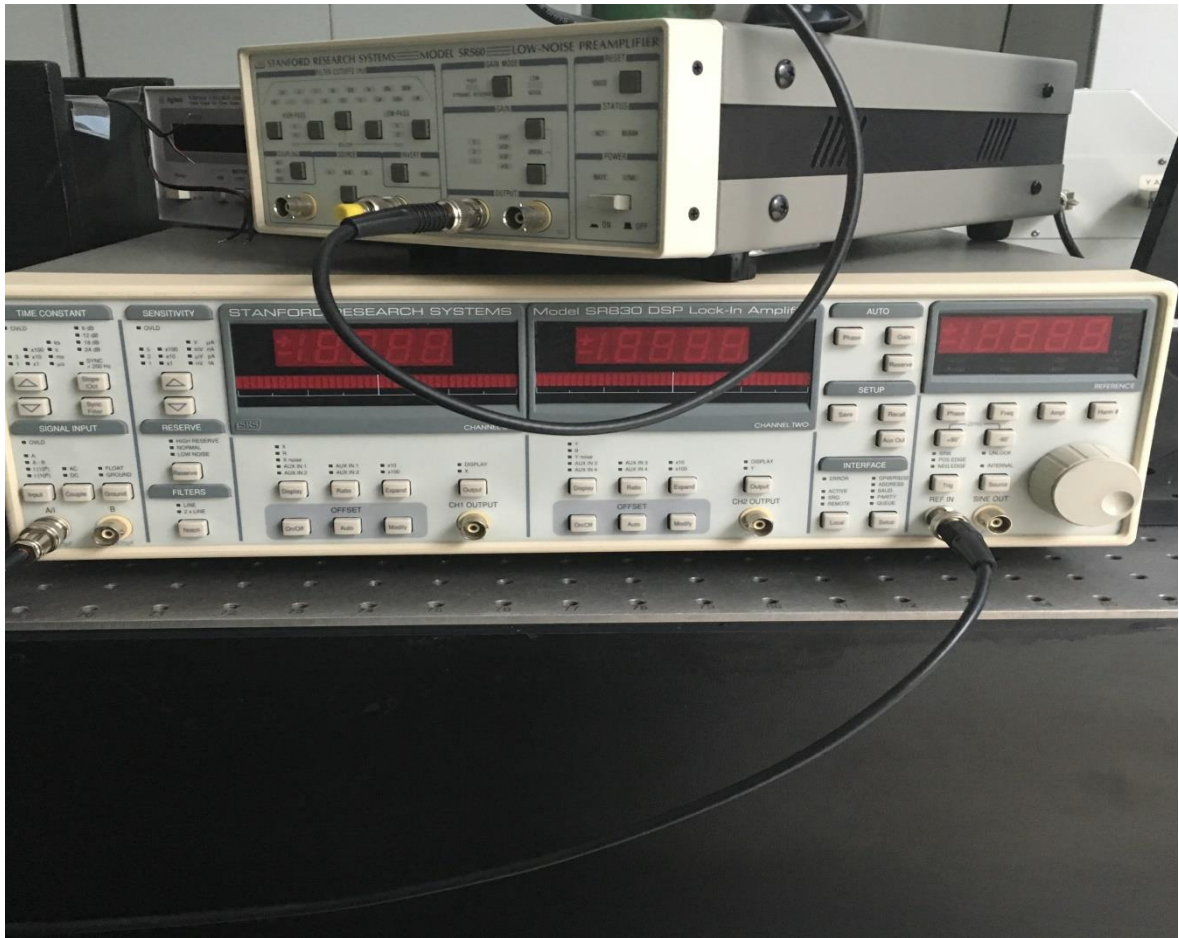
4.6 Fotodioda



Obrázek 17: Fotodioda SP102

Použitá fotodioda je vyrobena z křemíku. Je zapojena v závěrném směru. Bez osvětlení jimi protéká jen nepatrný proud způsobený teplem. Pro měření byla zvolena fotodioda typu SP 102. Technické parametry této fotodiody jsou přiloženy na Obrázek 23: Technické parametry fotodiodyObrázek 23, který je přiložen v příloze PI.

4.7 Lock-In SR 830 DSP



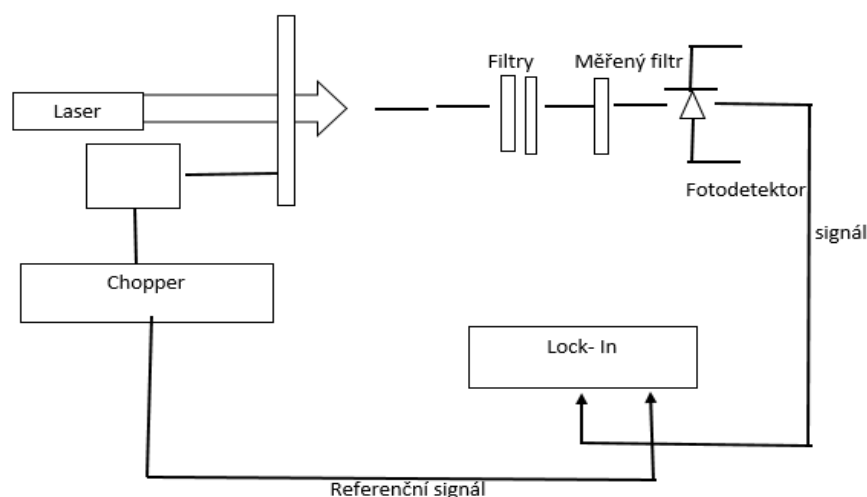
Obrázek 18: SR 830 DSP Lock-In

Model SR 830 Lock-In je schopen zobrazit velikost i fáze signálu. Tento přístroj používá digitální zpracování signálu.

Výhodou tohoto zesilovače je jednoduché používání. Lock-in používá technických znalosti fázové detekce na výstupním signálu a vyhodnocuje výstupní signál pomocí specifické referenční frekvence.

5 MĚŘENÍ OPTICKÉ HUSTOTY A VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ FOTODIODĚ

V předchozí kapitole jsme Vás seznámila s jednotlivými přístroji, které jsou důležité pro měření. Nyní přejdeme k samotnému měření a návrhu na zlepšení poměru signálu a šumu použitého zařízení. Zdrojem signálu je výše uvedený zelený laser. Tento optický zdroj vyzařuje světelné záření modulované optickým chopperem a tímto optickým signálem je buzen měřený filtr. Měřený filtr signál vycházející z laseru absorbuje a emituje na fotodetektor. Signál z optického detektoru vstupuje spolu s referenčním signálem do Lock-In zesilovače, zde je zesílen, nežádoucí šum je potlačen a výstupní signál zaveden na výstup Lock-In zesilovače.



Obrázek 19: Schéma zapojení experimentálního zařízení

Pro experimentální měření slabých toků záření za účelem zjištění optické hustoty šedých filtrů jsem použila zapojení, které je znázorněno na obrázku 19. Měřený signál namodulujeme na danou frekvenci v mém případě 163 Hz a výstupní referenční signál z chopperu připojím na referenční vstup Lock-In. Optický signál dopadající na fotodiodu je zeslabený o útlum signálu na vloženém filtru. Na Lock-In je připojen signál z fotodiody a ten nám zobrazuje napětí na fotodiodě, které je závislé na velikosti dopadajícího optického záření. Světelným zdrojem je v mém případě laser. Toto záření je namodulováno v optickém modulátoru (chopper). Úkolem vysílací a přijímací části optického systému je převést optický signál s co nejnižšími ztrátami z vysílače do optického prostředí a dále na přijímací straně na fotodetektor.

5.1 Měření optické hustoty filtru

Po zapojení jednotlivých přístrojů byla změřena optická hustota jednotlivých filtrů. Byly změřeny postupně filtry označené číslem 3 až 14. Jeden filtr s označením 3 byl konstantní, aby se nepřebudilo zařízení Lock-In. V první řadě bylo změřeno vstupní napětí s konstantním filtrem, dále byly přidávány jednotlivé filtry a měřeno výstupní napětí. Pro jistotu a kontrolu, zda čísla na jednotlivých filtrech mají nějaký význam, byly použity vždy dva filtry.

Prostřednictvím naměřených hodnot, které jsou uvedeny v příloze Tabulka 6, tedy vstupního napětí a intenzity je možné vypočítat transmitanci neboli propustnost přes daný filtr. Výpočet vychází ze vztahu, který je popsán v kapitole 1.5. Příklad výpočtu transmitance pro Filtr 3.1:

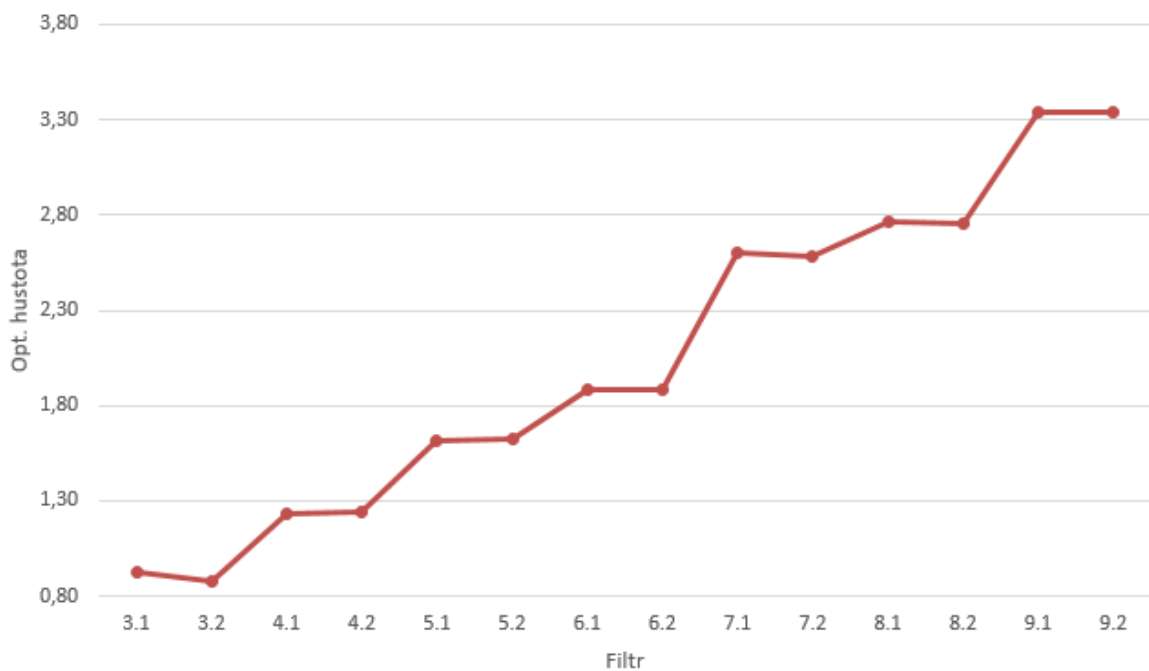
$$\tau = \frac{I}{I_0},$$

$$\text{kde } \tau = \frac{20,02}{2,38} = 8,41mV.$$

Po zlogaritmování propustnosti dostaneme optickou hustotu,

$$D = \log \tau = \log 8,41 = 0,93$$

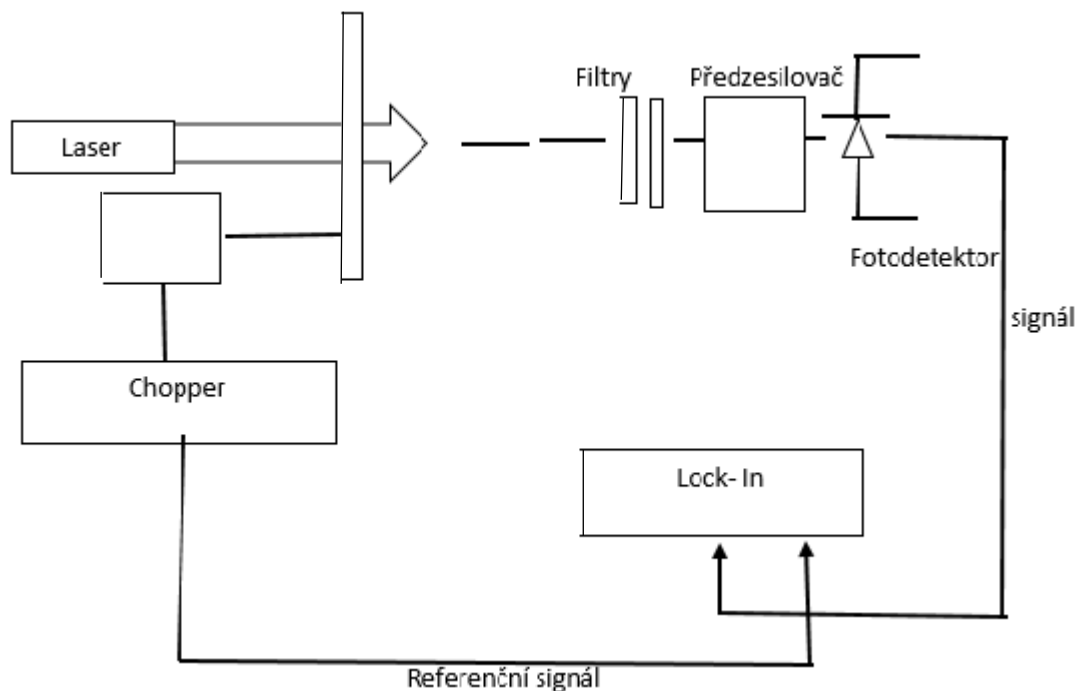
Tímto způsobem jsem postupovala u všech filtrů a výsledky poté znázornila do Graf 1.



Graf 1: Závislost optické hustoty na zvoleném filtru.

V grafu 1 je znázorněna závislost optické hustoty na jednotlivých filtrech. Čím větší číslo filtru bylo, tím byla optická hustota větší, tedy platí zde přímá úměra. Platí, že čím více světla filtr nebo jakýkoli jiný materiál absorbuje, tím je optická hustota větší.

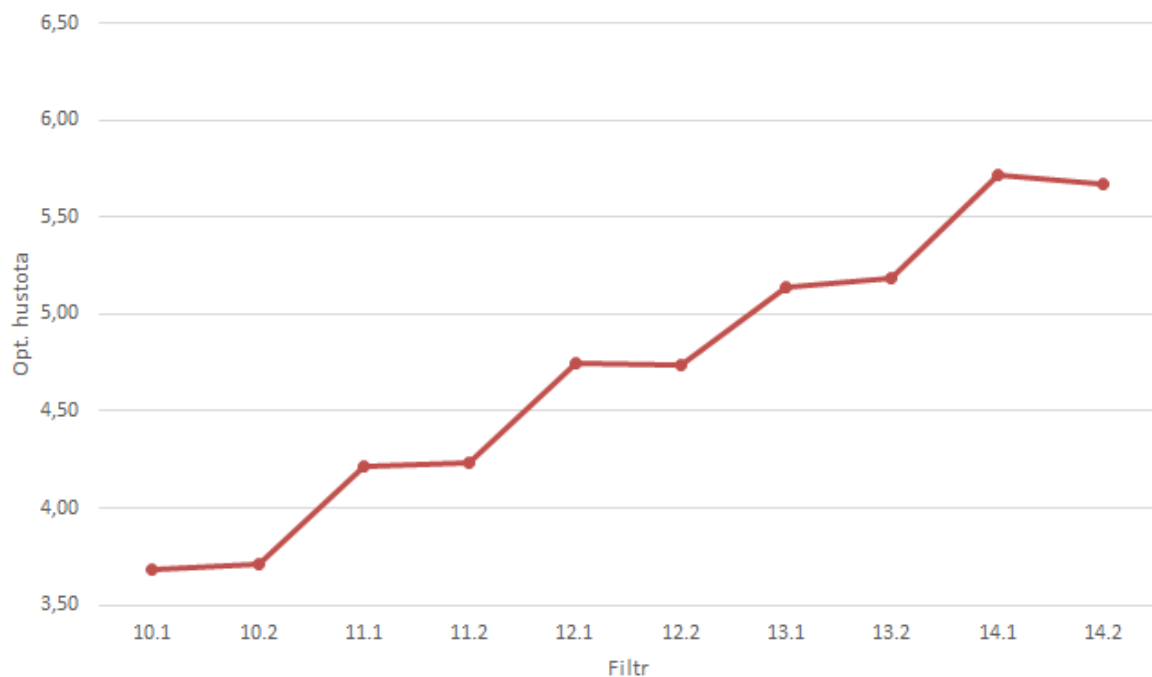
U filtrů číslo 10 až 14 při zapojení, které je znázorněno v kapitole 4 nebylo možné naměřit napětí výstupního signálu, protože útlum procházejícího paprsku byl vysoký a bylo nutné minimalizovat šum. Proto byl do zapojení přidán předzesilovač, který je schopen zesílit výsledný signál. Na předzesilovači bylo nastaveno zesílení 10x, což stačilo pro to, aby bylo možné jednotlivé výstupní napětí těchto filtrů naměřit.



Obrázek 20: Schéma zapojení aparatury s předzesilovačem

Z důvodu toho, že výkon signálu, který dopadá na optický detektor v tomto případě na fotodiodu je velmi slabý, je třeba tento signál zesílit. Proto byl mezi měřicí přístroje připojen zesilovač. Toto zapojení je vidět na obrázku 20. Bylo zajímavé pátrat po tom, jaký vliv vlastně bude mít předzesilovač na výstup Lock-In. V tomto případě laser emituje optický signál na detektor. Toto záření je namodulováno chopperem a tímto signálem je buzena fotodioda. Signál z fotodiody prostupuje přes předzesilovač a spolu s referenčním signálem z chopperu vstupuje do Lock In zesilovače.

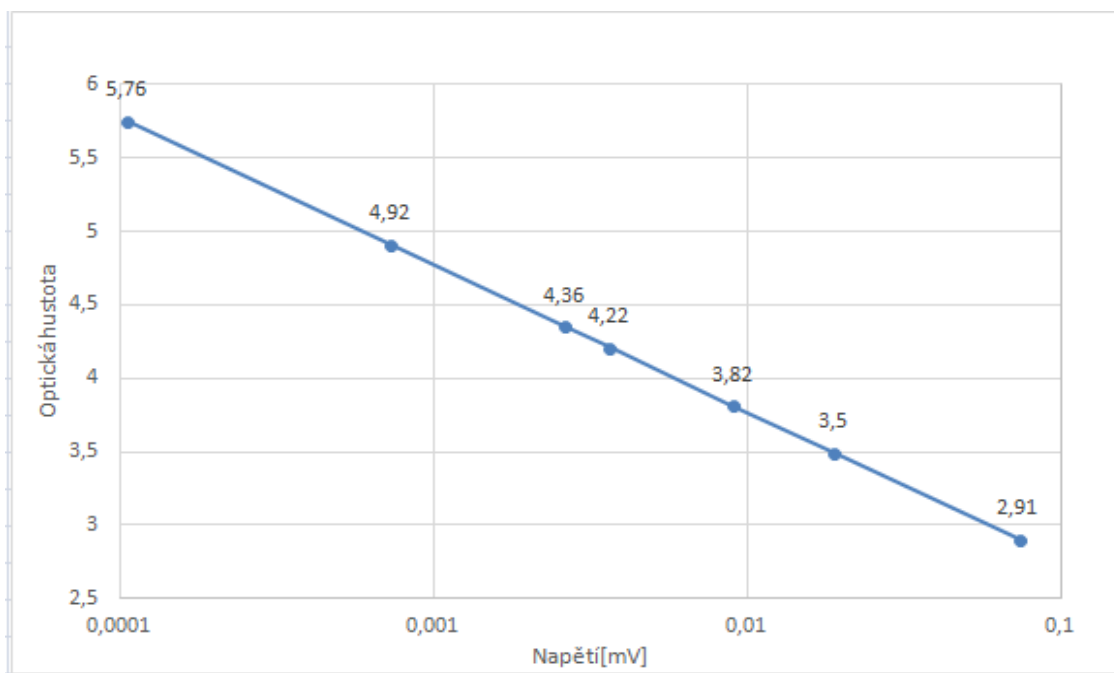
Předzesilovač je napěťový zesilovač, u kterého se dá nastavit úroveň zesílení. Při zvolení vhodných filtrů především s pásmovými propustmi naladěnými na měřený signál, je možné potlačit nežádoucí signál a šum v ostatních pásmech a zesílit měřený signál. Filtr s dolní propustí slouží k odstranění vyšších harmonických složek produktu násobení. Filtr je schopný potlačit všechny rozdílové kmitočty, které se nacházejí mimo propustné pásmo a na výstupu zůstanou pouze ty kmitočty, které se dostaly do jeho propustného pásma. Jestliže nastavíme velmi nízký mezní kmitočet filtru, dojde k vyššímu útlumu šumu, který bude na výstupu a tím dojde ke zvýšení poměru signál a šum neboli SNR. Avšak každá frekvence větší než nastavená na filtru dolní propusti bude potlačena a nepromítne se na výstupu.



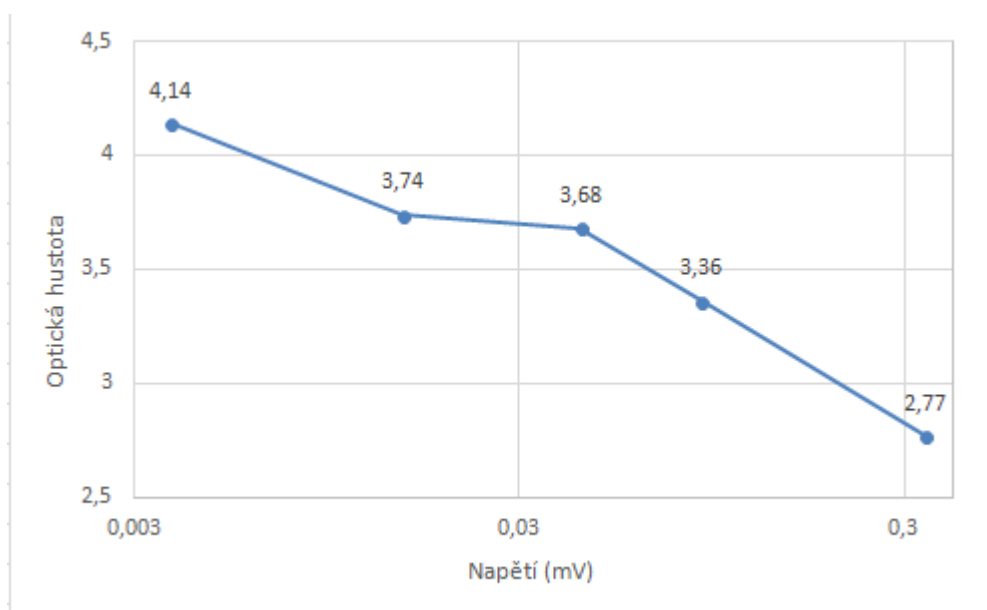
Graf 2: Závislost optické hustoty na jednotlivých filtrech s předzesilovačem

V grafu 2 můžeme tedy vidět také přímou úměrnost mezi filtrem a optickou hustotou. Při výpočtu bylo postupováno stejně jako u předchozího grafu s tím rozdílem, že výstupní hodnota se musela vydělit 10 z důvodu zapojení předzesilovače do aparatury.

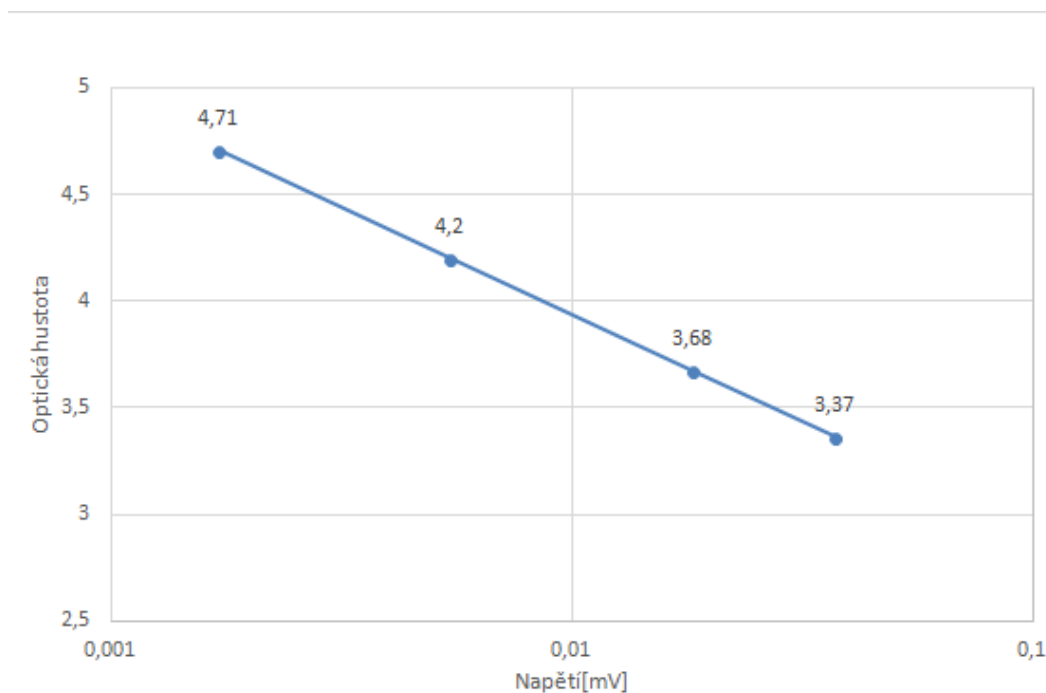
Následovně bylo do sestavené aparatury přidáno ke konstantnímu filtru 3 další filtr 3 a dále filtry od 8 až po 14. Naměřené hodnoty z Tabulka 8 byly zakresleny do grafu. Následující obrázek tedy popisuje závislost úrovně vstupního signálu na optické hustotě vložených filtrů.



Graf 3: Závislost výstupního signálu na optické hustotě s filtrem 3+3



Graf 4: Závislost optické hustoty na výstupním signálu s filtrem 3+4

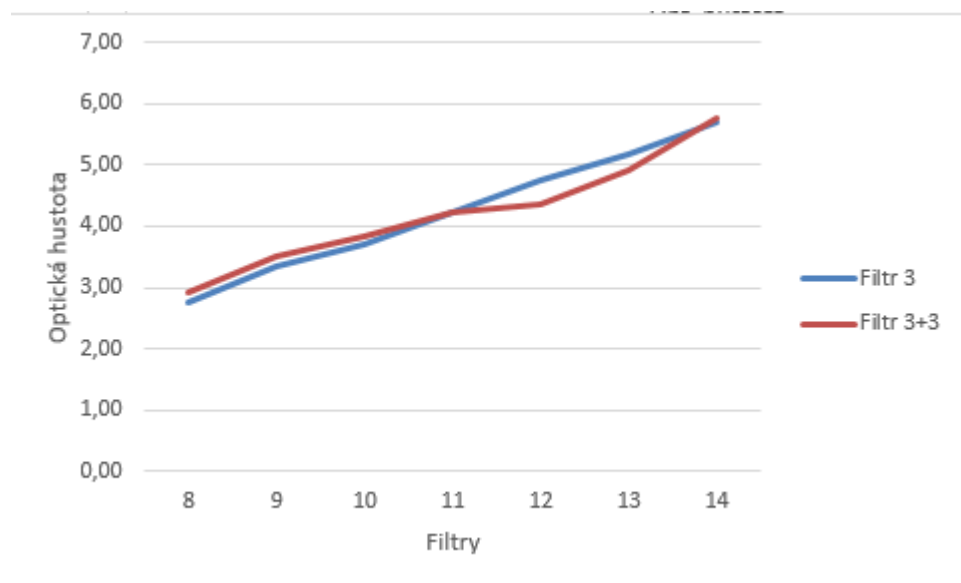


Graf 5: Závislost optické hustoty na výstupním signálu s filtrem 3+5

Je vidět, že čím větší je optická hustota, tím menší je úroveň optického záření dopadajícího na fotodiodu a tím menší je napětí měřitelné na fotodiodě. Optická hustota filtru byla počítána stejným způsobem, jako u předešlých grafů.

Filtry	Filtr 3	Filtr 3+3
8	2,77	2,91
9	3,34	3,5
10	3,7	3,82
11	4,22	4,22
12	4,75	4,36
13	5,1	4,92
14	5,7	5,76

Tabulka 4: Porovnání hodnot



Graf 6: Optické hustoty filtrů

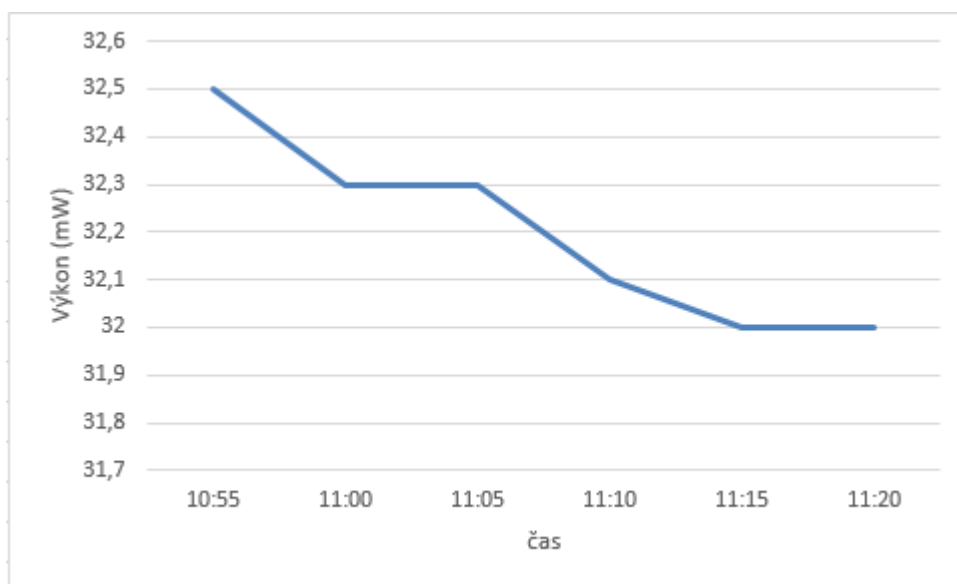
V Tabulce 4 jsou znázorněny optické hustoty filtrů 8-14, kdy v druhém sloupci je vidět výsledek optických hustot s konstantním filtrem 3. Ve třetím sloupci jsou znázorněny optické hustoty při dvou stálých filtrech označených 3. Je vidět, že optická hustota jednotlivých filtrů se žádným velkým způsobem nezměnila. Stejný postup byl i s filtrem 3+4 a 3+5. Tyto jednotlivé závislosti byly zaznamenány do grafů 3, 4, 5. Jak je možno spatřit graf 4 není lineární z důvodu chyby v měření. Předpokládanou chybou je pohyb laseru, tedy nebyl namířen přímo na fotodiodu, tudíž výsledný výstupní signál u filtru 11 je chybný.

5.2 Měření výkonu laseru

K tomu, aby byl zjištěn výkon laseru, musel být použit měřič výkonu laseru Vega od firmy Ophir, který je podrobněji popsán v kapitole 4. Měření výkonu laseru je velmi důležitá součást celkové diagnostiky laseru a naměřené hodnoty budou použity pro další výpočty. Proto, aby bylo možné získat hodnotu výkonu, musel se laser namířit na tepelný snímač. Aby bylo měření co nejpřesnější, laser dopadal na tepelný snímač po dobu 25 minut a po každých 5- ti minutách byly zapisovány hodnoty. Ty jsou v Tabulce 5.

Čas	Naměřené hodnoty (mW)
10:55	32,3
11:00	32,5
11:05	32,3
11:10	32,1
11:15	32
11:20	32

Tabulka 5: Měření výkonu laseru



Graf 7: Závislost výkonu laseru na čase

Naměřené hodnoty z tabulky 5 jsou zakresleny do grafu 7. Z grafu je patrné, že ihned po namíření laseru na tepelný snímač byla hodnota 32,5 mW. Poté výkon laseru začal klesat a po 20- ti minutách se ustálil. Tudíž je možné konstatovat, že použitý optický zdroj tedy zelený laser má výkon 32mW.

5.3 Měření odporu fotodiody



Obrázek 21: Přístroj na měření odporu

Pomocí přístroje na obrázku 20 byl změřen odpor fotodiody. Hodnota odporu je $R = 991,8\Omega$.

5.4 Měření linearity hustoty

Při posledním měření byla zjišťována linearita hustoty. Do zapojení byly přidávány různé druhy filtrů s odlišnou mírou propustnosti. Nejdříve byly použity filtry s větší mírou propustnosti. U filtrů s menší propustností byl zapojen předzesilovač. Nejmenší míra propustnosti byla naměřena u filtru 3+3+14 a největší u filtru 3, protože po odstranění všech filtrů a působení záření s laseru na fotodiodu, měl Lock – In velké problémy tuto hodnotu zobrazit.

Pro zjišťování správnosti naměřeného napětí byl použit vztah:

$$D_3 = \log\left(\frac{\text{Filtr } 3}{\text{Filtr } 3+3}\right)$$

$$D_3 = \log\frac{401,2}{52,63} = 0,88.$$

Následně byl vypočten proud. Pro výpočet proudu byl použit vzorec:

$$I = \frac{U}{R}, \text{ kde}$$

$$I = \frac{401,2}{991,8} = 0,404 \text{ mA.}$$

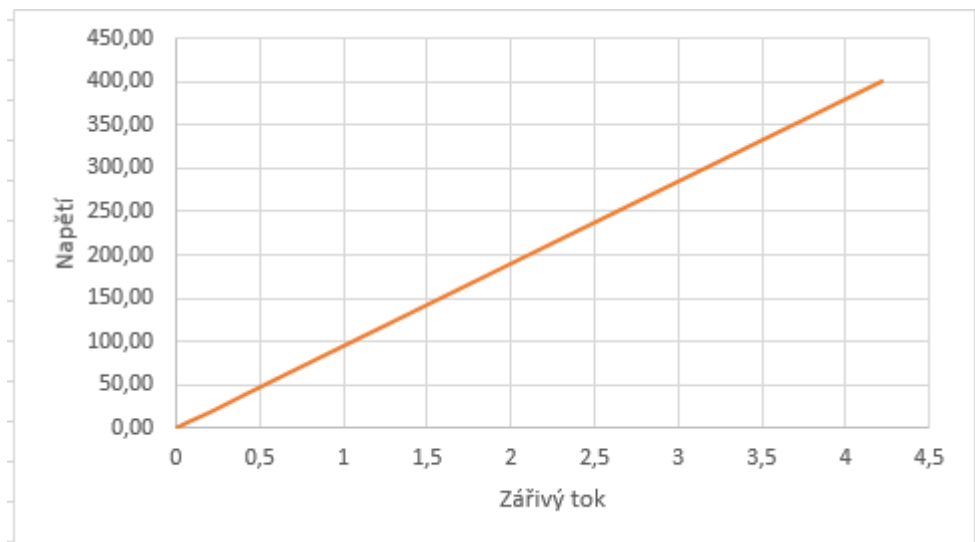
U je napětí a R je odpor. Pomocí přístroje na obrázku 21 byl naměřen odpor. Napětí bylo získáno prostřednictvím měření.

Pro výpočet zářivého toku, jsme použili vztah:

$$D = \log \frac{\phi_{in}}{\phi_{out}},$$

$$0,86 = \log \frac{32}{\phi_{out}},$$

$$\phi_{out} = \frac{32}{10^{0,86}} = 4,42 \text{ mW.}$$



Graf 8: Závislost napětí na zářivém toku

V grafu 8 je znázorněna závislost napětí na zářivém toku. Pokud roste zářivý tok, tak roste také napětí. Pokud se budeme při zvyšování zářivého toku pohybovat v lineární části charakteristiky diody, bude nárůst napětí lineární. Jak je vidět v grafu, mimo lineární část charakteristiky diody jsme se v průběhu měření nedostali.

Následně jsem spočítala dynamický rozsah senzoru, což je poměr mezních hodnot, které je přístroj schopen měřit.

$$10 \log \frac{\phi_{max}}{\phi_{min}}$$

$$10 \log \frac{4,42}{1,3 \cdot 10^{-6}} = 65,3 \text{dB}.$$

V závěru práce bylo zjišťováno, na jakou vzdálenost je možné použít tento laser s fotodetektozem. Pro výpočet této vzdálenosti se použil vztah:

$$\alpha = \frac{17}{Vm \left(\frac{555}{\lambda} \right)^q}$$

kde Vm je meteorologická dohlednost, λ je délka vlny v nm, a q závisí na Vm .

$q = 1.6$ pro $Vm > 50$ km;

$q = 1.3$ pro $6 \text{ km} < Vm \leq 50$ km;

$\lambda = 532$ nm, což je vlnová délka laseru

$Vm =$ dohlednost jsem stanovila 10 km.

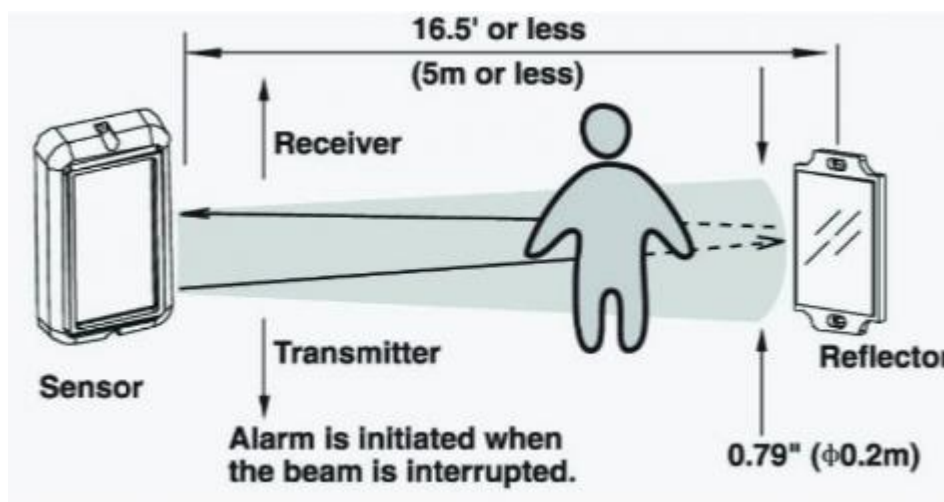
$$\alpha = \frac{17}{10 \cdot \left(\frac{555}{532} \right)^{1,3}} = 2 \text{dB/km}.$$

Tudíž vzdálenost mezi laserem a detektorem při dohlednosti 10 km je 20 km.

6 NÁVRH VYUŽITÍ ZAŘÍZENÍ V PKB

Vhodným návrhem využití zkonstruované aparatury v PKB jsou infrazávory. Tyto závory je možné použít jak pro vnitřní prostředí, tak i pro venkovní prostředí.

Tento detektor je složen z vysílače a přijímače. Vysílač vysílá IR paprsek a přijímač tento IR paprsek přijme. Jestliže je IR paprsek přerušeno, je vyhlášeno narušení. Infrazávory se především používají na detekování vstupu do chráněné oblasti. Infrazávory můžeme rozdělit na vyhřívané a nevyhřívané. Tyto nevyhřívané detektory vysílají nenamodulovaný signál a nesmí na přijímač dopadat více paprsků z více vysílačů. Což znamená, že na jedné straně musí být pouze jeden přijímač a na druhé pouze vysílač. Nevyhřívané závory jsou málo imunní proti námraze a namrzajícímu sněhu. V těchto extrémních případech může dojít k přerušování IR signálu a k detekci narušení. Proto je vhodné tyto závory používat spíše pro prostorovou perimetrickou ochranu. Jestliže je požadována vysoká odolnost proti povětrnostním podmínkám je, nutné nainstalovat vyhřívané infrazávory jejichž paprsek je modulovaný. V praxi to znamená, že vysílač vysílá kódovaný IR signál, který je určen pouze pro jeden IR přijímač a neovlivní ostatní přijímače. Toto kódování zaručuje, že jednotlivé páry infrazávory se nebudou ovlivňovat a je možné instalovat nad sebe několik vysílačů nebo přijímačů. Proto je vhodné tyto vyhřívané infrazávory použít jak pro plášťovou ochranu tak i pro prostorovou. Myslím si, že použití těchto detektorů je v prostorové ochraně zbytečné, protože jsou tyto závory dražší než nevyhřívané a ve vnitřním prostředí není tolik vnějších vlivů, které by mohli působit na tyto závory a tím vyvolávat falešný poplach nebo narušení daného prostoru. Nevýhodou těchto detektorů je nutná přítomnost blízkého zdroje napájení. Obě části musí být nainstalovány tak, aby nedocházelo k jejich pohybu nebo chvění. Jestliže dojde k vychýlení jedné ze dvou částí, způsobí to vychýlení až v desítkách centimetrů. V cestě IR paprsku nesmí být žádná překážka. Po upevnění vysílače a přijímače se musí sestava seřadit, aby IR paprsek dopadal na senzory přijímače.



Obrázek 22: Princip infrazávory [30]

Dalším detektorem, založeným na optickém záření je optický detektor kouře. Při hoření dochází k vytváření kouřových aerosolů a plynů a zároveň vyzařuje teplo. Tyto detektory jsou používány v protipožární ochraně pro signalizaci požáru v jeho rané fázi.

Optický typ protipožárních detektorů se používá u doutnajících ohňů z důvodu citlivosti pro střední až velké částice aerosolu. Ionizační detektory kouře jsou nejcitlivější vůči neviditelnému kouři. Oproti tomu optické detektory rozptylového typu jsou nejcitlivější vůči viditelným částicím. Citlivost optických detektorů založených na pohltivosti jsou na velikosti částic v podstatě nezávislé. Pracují na principu namodulování světelného paprsku ze světelného zdroje a to je promítáno skrz začerněnou komoru. Pro zajištění kouře je tato komora otevřena. Přijímač světla je namířen k promítanému paprsku pod určitým úhlem rozptylu. Část světla se odráží k přijímači světla. Napětí na detektoru světla spouští alarm. Nevýhodou optických senzorů je to, že pokud vzduch proudí v dané místnosti, může se stát, že kouř nezasáhne senzor. Optické detektory kouře jsou málo citlivé na rychle hořící ohně, které produkují plameny a pouze velmi malé, neviditelné kouřové částice. Díky těmto nevýhodám můžeme říci, že optický detektor kouře by měl být používán spíše v uzavřených prostorách a jeho umístění by mělo být pod stropem. K tomu, aby nedošlo k zaprášení a následnému falešnému poplachu by měl být každý detektor pravidelně čištěn a měla by být zkoušena i jeho funkčnost.

Také existuje velké množství signalizačních zařízení závislých na optice. Mezi tyto optické výstražné zařízení patří různé druhy majáků, žárovkových a výbojkových signálů a kontrolů.

ZÁVĚR

Při zpracovávání této diplomové práce byly použity přístroje, které umožňují sestavit experimentální zařízení pro měření slabých optických signálů. Optika jako vědní obor má široké využití nejen ve zdravotnictví, technice, ale i v informačních technologiích a v neposlední řadě v průmyslu komerční bezpečnosti.

V teoretické části jsou rozebrány základní fyzikální pojmy, jako je elektromagnetické spektrum, co je zdrojem světla, typy detektorů a především tedy základní metody týkající se přenosu signálu potřebné pro pozdějšího měření. Následně jsou popsány základní metody zpracování slabých optických signálů.

V praktické části jsou popsána jednotlivá zařízení, zapojená do obvodu. Tato aparatura byla sestavena v laboratoři tak, aby prověřila praktické využití v mnoha oborech. Po zapojení bylo následně přistoupeno k samotnému měření. V první řadě byla měřena optická hustota jednotlivých šedých filtrů. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do grafů, ze kterých je patrné jak se mění optická hustota v závislosti na napětí. U filtrů s menší mírou propustnosti bylo nutné zapojit do obvodu předzesilovač, který zvýšil napětí o požadovanou hodnotu. Dále jsem v grafu zaznamenala linearitu změřených filtrů v závislosti zářivého toku na napětí. Z tohoto grafu byl zjištěn poměr mezi nejmenší a největší hodnotou neboli dynamický rozsah senzoru.

Cílem diplomové práce bylo měření slabých optických signálů, konstrukce měřicí aparatury za účelem možnosti zlepšení poměru signálu, šumu a jak je možné sestavené zařízení využít v průmyslu komerční bezpečnosti. Pro zlepšení poměru signálu a šumu byl použit nízko napěťový zesilovač, který minimalizuje šum. Maximální dosah laseru jsem spočítala pomocí vzorce pro výpočet koeficientu útlumu. Díky tomuto zjištění je možné určit, v jakém prostředí je laser schopen správně pracovat. Vhodným návrhem pro zajištění bezpečnosti jak prostředí, tak objektu jsou aktivní infračervené detektory, infrazávory atd. Tyto detektory pracují na obdobném principu jako navrhovaná aparatura. Jednou z výhod je možnost velkého rozsahu mezi vysílačem a přijímačem.

Z projektu diplomové práce tedy vyplývá, že je velmi důležitý přímý dopad světelného záření z laseru na fotodiodu. Došli jsme ke zjištění, že se zvyšováním optické hustoty klesá napětí. Po celou dobu měření jsme se pohybovali v lineární charakteristice diody.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

During processing of this Thesis where used devices enable set up experimental device for measurement of small optical signals.

Optics as science discipline has not wide range even in health care, technics but also in Information technologies. And at least in commercial safety industry.

In theoretical part are solved elementary physical terms as electromagnetic spectre, what is the source of light, types of detectors and especially basic methods of signal transmisson of small optics signal treatment.

Individual devices connected to circuit are described in practical part of Thesis. This machinery was assembled in laboratory so to verify practical use of many disciplines.

After the connection was started very mensuration. Optical density of single grey filters was measured first. Measured values were recorded into the graphs, from which the changes of optical density conected to voltage can be seen. Filters with lower level transmittance were provided with preamp to rise the voltage to the requested rate.

In the graph further is recorded linearity of measured filters according to radiance flow and voltage. From this graph was found the ratio between the smallest and largest value so-called dynamical range of sensor.

The main aim of Thesis was measurement of small optical signals, construction of measurement machinery for purpose of improvement signal ratio to noise, and possibilities of exploitation assembled device to commercial safety industry.

For improvement of signal noise ratio was low-voltage amplifier minimizes the noise used.

I have been calculated maximum laser range using the formula for calculation of attenuation coefficient. Thanks to this result is possible to determine right enviroment for proper function of laser. The right sugestion to ensure safety of enviroment and building are active IR detectors, IR gates etc. This detectors works on equivalent principle as sugested machinery. One of the advantage is possibility of wide range in-between transmitter and receiver.

The Thesis project results , that is very important straight influence of laser photolight to photodiode. We found that by increasing of optical density is falling voltage. During whole time of measurement we were in the range of linear characterics of diode.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VOŠICKÝ, Zdeněk, LANK, Vladimír a VONDRA, Miroslav. *Matematika a fyzika: matematika, cvičení z matematiky, fyzika*. 1. vyd. [Havlíčkův Brod]: Fragment, 2007. 124, 208, 120 s. ISBN 978-80-253-0523-2.
- [2] Optické jevy. *Primoloco* [online]. Kadov u Blatné: Jan Čipera, 2016 [cit. 2016-05-03]. Dostupné z: <http://www.primoloco.cz/Opticke-jevy.html?gen=819>
- [3] FUKA, Josef a HAVELKA, Bedřich. *Optika a atomová fyzika. 1. [Díl], Optika. Fyzikální kompendium pro vys. školy. Díl 4*. 1. vyd. Praha: SPN, 1961. 845 s. Učebnice pro vys. školy.
- [4] RIEKE, G. H. *Detection of light: from the ultraviolet to the submillimeter*. 2nd ed. New York, NY: Cambridge University Press, 2003, xi, 363 p. ISBN 0521017106
- [5] Laserové diody. *Elektrorevue* [online]. Olomouc, 2001 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>
- [6] PARDUBA, Bc. Jiří. *VYUŽITÍ OPTICKÉHO VLÁKNA JAKO SENZORU PRO LOKALIZACI MECHANICKÉHO CHVĚNÍ* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-05-06]. Dostupné: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68114. Diplomová práce.
- [7] HORÁK, Zdeněk a KRUPKA, František. *Fyzika: příručka pro vysoké školy technického směru*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1976. 2 sv. (1128 s.).
- [8] REICHL, Jaroslav. *Disperze světla* [online]. 2006, 1 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/441-disperze-rozklad-svetla#>
- [9] BURDOVÁ, Pavla. *Filtry v optice a optometrii* [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-05-06]. Dostupné: file:///C:/Users/NTB/Desktop/materiály%20k%20diplomce/BP_final_tisk.pdf. Bakalářská práce.

- [10] NOVÁK, Lukáš. *Metoda citlivé optoelektronické detekce a její aplikace*. Praha 2013. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/19203/Disertace_Novak_Lukas_2013.pdf. Disertační práce.
- [11] VEČEŘA, František. *Měření světelné účinnosti zdrojů světla* [online]. Brno, 2011. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/211557/prif_m/Mereni_svetelne_ucinnosti_zdroju_svetla__diplomova_prace.pdf. Diplomová práce.
- [12] EJKL, František. *FTX-pasivní infrastruktura* [online]. 2014 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://www.optomedia.cz/data/files/28tejklpasivniinfrastrukturapart1.pdf>
- [13] ULLMANN, RnDr. Vojtěch. *Detekce a spektrometrie ionizujícího záření* [online]. [cit. 2016-05-06] Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>
- [14] *Interference světla* [online]. [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/08_interf/08_interf.htm
- [15] LEPIL, O. *Fyzika pro gymnázia – Optika*. 3. vyd. Praha: Prometheus, 2002
- [16] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. Olomouc, 2010. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
- [17] SMEJKALOVÁ, Hana. *Způsoby světlostálosti barevných fotografií* [online]. Brno, 2010. Dostupné z: [filehttp://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26814](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26814)
- [18] *Lavinové fotodiody* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/detektory---oem-prvky-119k/si-fotodiodove-detektory174k/lavinove-fotodiody-apd-37p>

- [19] *Photon counting* [online]. Japan: Hamamatsu, 2016 [cit. 2016-05-06].
Dostupné z: <http://www.hamamatsu.com/us/en/technology/innovation/photoncounting/index.html>
- [20] *Charge Couple deviced* [online]. Hamamatsu, 2016 [cit. 2016-05-06].
Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device
- [21] PELANT, Ivan a Jan Valenta. *Luminescence spectroscopy of semiconductors*. 1st pub. New York: Oxford University Press, 2013, xiv, 542 s. ISBN 978-0-19-958833-6
- [22] OLEJÁR, Martin. *Nízkofrekvenční měřič komplexního napětového přenosu* [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.elweb.cz/IngMartinOlejar.pdf>. Diplomová práce.
- [23] KALÁNEK, Jakub. *Praktická realizace generátoru šumu* [online]. Brno, 2010
Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28651. Bakalářská práce.
- [24] BIOLEK, Z. Úvod do SPICE pomocí programu MicroCap. Učební texty SPŠE v Rožnově p.R. SENSIT HOLDING s.r.o., 2004, 34 s.
- [25] DOBEŠ, Josef. *Šumová analýza* [online]. 2013 [cit. 2016-05-12].
Dostupné z: <http://radio.feld.cvut.cz/personal/dobes2/Noise.pdf>
- [26] DĚDINA, Bc. Radim. *Detekce ionizujícího záření pomocí Geiger-Müllerova detektoru* [online]. Brno, 2008 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8291. Diplomová práce.
- [27] ŘEHÁK, Bc. Miloš. *Ochrana obyvatelstva před účinky ionizujícího záření* [online]. Zlín, 2009 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z:

- http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/8038/řehák_2009_dp.pdf?f?sequence=1. Diplomová práce.
- [28] *PHOTOP: DPGL - 3020* [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: http://www.phototech.com/main/products_jg/catalog/DPGL-3020.pdf
- [29] *OPHIR* [online].2016[cit.2016-05-12].Dostupné z: <http://www.ophiropt.com/laser--measurement/laser-power-energy-meters/products/smart-displays/vega?r=drp>
- [30] ŠTĚPÁNEK, Miroslav. *Edukační materiál pro prvky, zařízení a technologie využívané v elektronických zabezpečovacích systémech - čidla aktivní* [online]. Zlín, 2006 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/1606?locale-attribute=cs>. FAI UTB.
- [31] *Fotonásobič* [online]. 2016.Dostupné z:<https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotonásobič>.
- [32] *Photomultiplier tube modules* [online]. Japan: Hamamatsu, 2016 [cit. 2016-05-06]. Dostupné:http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/PMTmodules_TPMO0011E.pdf
- [33] *Operační zesilovač* [online]. 2016 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/ea/oz.pdf
- [34] STUART BARBARA. *Forensic Analytical Techniques*. [online]. Wiley 2013.
- [35] HODGKINSON, Jane a Ralph P TATAM. Optical gas sensing: a review. *Measurement Science and Technology* [online]. 2013, 24(1), 012004- [cit. 2016-02-04]. DOI: 10.1088/0957-0233/24/1/012004. ISSN 0957-0233. Dostupné z:<http://stacks.iop.org/09570233/24/i=1/a=012004?key=crossref.186f22f51705291454051e991ac0a72d>.
- [36] HAWKES, P a John C SPENCE. *Science of microscopy*. 1. New York: Springer, 2007, 2 v. (xviii, 1265, 126 p.). ISBN 03-872-5296-7.

- [37] SIEGEL, Jay A a Pekka SAUKKO (eds.). Encyclopedia of forensic sciences. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013, xliii, 412 s. ISBN 978-0-12-398365-7.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AIR	Active Infrared detector.
APD	Avalanche Photodiode.
CPM	Channel Photomultiplier.
IR	Infračervené záření.
LED	Light Emitting Diode.
PIN	Polovodičová dioda.
PKB	Průmysl komerční bezpečnosti.
PMT	Photomultiplier.
SPCM	Single Photon Counting Modul.
UV	Ultrafialové záření.
c	Rychlost světla ve vakuu.
D	Optická hustota.
df	Šířka kmitočtového pásma, v němž se šum měří.
e	Elementární náboj elektronu.
E_{ph}	Energie
h	Planckova konstanta.
I	Intezita.
I_0	Intezita dopadajícího paprsku.
I_j	Proud Johnsonova šumu.
I_{noise}	Napěťový šum.
K	Botzmanova konstanta.
k	Řád interferenčního minima nebo maxima.
N	Šum výkonu ve wattch.
R	Odpor.

S	Signál výkonu ve wattech.
T	Teplota.
T	Transmitance.
V_{out}	Výstupní napětí.
V_1	Vstupní napětí.
V_2	Vstupní napětí.
λ	Vlnová délka.
Δf	Šířka pásma.
Δl	Infračervené záření.
τ	Propustnost.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Elektromagnetické spektrum [2]	11
Obrázek 2: Luminiscenční diody a laserové diody [5]	13
Obrázek 3: Disperze světla	15
Obrázek 4: Youngův pokus [15]	17
Obrázek 5: Princip fotonásobiče [19]	21
Obrázek 6: Schéma operačního zesilovače [4]	22
Obrázek 7: Schéma transimpedačního zesilovače s fotodiodou. [4]	23
Obrázek 8: Funkce CCD snímače [20]	25
Obrázek 9: Blokové schéma Lock-In zesilovače [21]	26
Obrázek 10: Blokové schéma elektronického detektoru [27].....	30
Obrázek 11: Laser DPGL 3020T	35
Obrázek 12: Měřič výkonu laseru.....	37
Obrázek 13: Drážkované kolo	38
Obrázek 14: Chopper	38
Obrázek 15: Šedý filtr.....	39
Obrázek 16: Předzesilovač SR560.....	40
Obrázek 17: Fotodioda SP102	41
Obrázek 18: SR 830 DSP Lock-In.....	42
Obrázek 19: Schéma zapojení experimentálního zařízení	43
Obrázek 20: Schéma zapojení aparatury s předzesilovačem	46
Obrázek 21: Přístroj na měření odporu.....	52
Obrázek 22: Princip infrazávory	56
Obrázek 23: Technické parametry fotodiody	71

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Radiometrické a fotometrické veličiny[17]	12
Tabulka 2: Technické parametry laseru DPGL 3020T [28]	36
Tabulka 3: Technické parametry předzesilovače.....	40
Tabulka 4: Porovnání hodnot.....	49
Tabulka 5: Měření výkonu laseru	51
Tabulka 6: Naměřené hodnoty bez zesilovače	72
Tabulka 7: Naměřené hodnoty se zesilovačem.....	72
Tabulka 8: Měření optické hustoty s filtrem 3+3	73
Tabulka 9: Měření optické hustoty s filtrem 3+4	73
Tabulka 10: Měření optické hustoty s filtrem 3+5	73
Tabulka 11: Hodnoty pro linearitu hustoty	73
Tabulka 12: Měření odporu fotodiody a výkonu laseru	74

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Závislost optické hustoty na zvoleném filtru.	45
Graf 2: Závislost optické hustoty na jednotlivých filtrech s předzesilovačem	47
Graf 3: Závislost výstupního signálu na optické hustotě s filtrem 3+3	48
Graf 4: Závislost optické hustoty na výstupním signálu s filtrem 3+4.....	48
Graf 5: Závislost optické hustoty na výstupním signálu s filtrem 3+5.....	49
Graf 6: Optické hustoty filtrů.....	50
Graf 7: Závislost výkonu laseru na čase	51
Graf 8: Závislost napětí na zářivém toku.....	53

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: DATASHEET FOTODIODY.....	69
PŘÍLOHA P II: TABULKY.....	70

PŘÍLOHA P I: DATASHEET FOTODIODY

21. 1. 2016

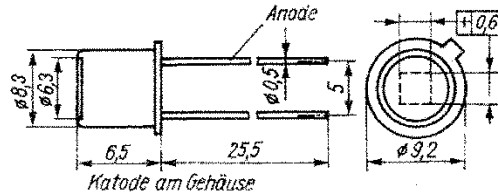
sp101.gif (700x1398)

SP 101 · SP 102 · SP 103

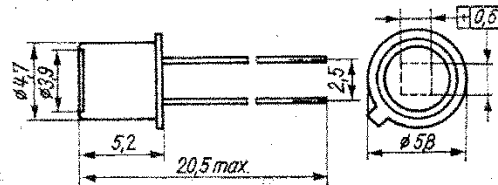
Schnelle implantierte Si-Epitaxie-Planar-Fotodioden als Fotodetektoren für optoelektronische Systeme mit Grenzfrequenzen im MHz-Bereich.

SP 102 → BPX 63

Bauform 7 (SP 101, SP 103)



8 (SP 102)



Grenzwerte bei $\vartheta_a = 25^\circ\text{C}$

Sperrgleichspannung	U_R	25 V	
Sperrstrom bei $E_e = 0 \text{ lx}$	I_R	1 mA	SP 101
		100 μA	SP 102
		3 mA	SP 103

Lagertemperatur	ϑ_{stg}	-40 ... +100 °C
Betriebstemperatur	ϑ_a	-40 ... +70 °C

Kennwerte bei $\vartheta_a = 25^\circ\text{C}$

(typ. Werte)		SP 101	SP 102	SP 103	
Sperrgleichstrom					
bei $E_e = 0 \text{ lx}$	$U_R = 20 \text{ V}$	$I_R 100$	4	150	nA
bei $E_e = 1000 \text{ lx}$	$U_R = 20 \text{ V}^1)$	$I_R 20$	1,6	70	μA
Empfindlichkeit bei monochromatischer Strahlung und $U_R = 20 \text{ V}$					
	$\lambda = 500 \text{ nm}$	S_{pH}	0,30		$\mu\text{A}/\mu\text{W}$
	$\lambda = 820 \text{ nm}$	S_{pH}	0,60		$\mu\text{A}/\mu\text{W}$
	$\lambda = 900 \text{ nm}$	S_{pH}	0,45		$\mu\text{A}/\mu\text{W}$
Wellenlänge bei max. spektraler Empfindlichkeit	$\lambda_{s \text{ max}}$		820 nm		
Gesamtkapazität					
bei $U_R = 0 \text{ V}$, $f = 1 \text{ MHz}$	C_{tot}	90	10	110	pF
$E_e = 0 \text{ lx}$					
bei $U_R = 20 \text{ V}$, $f = 1 \text{ MHz}$	C_{tot}	20	2	35	pF
$E_e = 0 \text{ lx}$					
Grenzfrequenz	f_{max}	135	150	120	MHz

¹⁾ gemessen mit einer Wolframlampe mit einer Farbtemperatur von 2 856 K (Normallichtart A)

Obrázek 23: Technické parametry fotodiody

PŘÍLOHA P II: TABULKY

Filtr 3-9	Filtr 3 (mV)	Intenzita (mV)	Propustnost (mV)	Opt. hustota
3.1	20,02	2,38	8,41	0,93
3.2	20,22	2,69	7,51	0,88
4.1	22,52	1,31	17,17	1,24
4.2	22,52	1,30	17,39	1,24
5.1	22,42	0,55	40,99	1,61
5.2	22,32	0,53	41,80	1,62
6.1	22,26	0,29	75,71	1,88
6.2	22,18	0,29	76,22	1,88
7.1	21,84	0,06	397,09	2,60
7.2	21,84	0,06	383,16	2,58
8.1	21,73	0,04	587,30	2,77
8.2	21,7	0,04	571,05	2,76
9.1	21,61	0,01	2161,00	3,34
9.2	21,66	0,01	2166,00	3,34

Tabulka 6: Naměřené hodnoty bez zesilovače

Filtr 3-9	Filtr 3 (mV)	Intenzita (mV)	Propustnost (mV)	Opt. hustota
10.1	374,1	7,76	4820,88	3,68
10.2	375,5	7,32	5129,78	3,71
11.1	374,5	2,31	16212,12	4,21
11.2	375,1	2,2	17050,00	4,23
12.1	372,3	6,7	55567,16	4,75
12.2	372,8	6,82	54662,76	4,74
13.1	372,3	2,73	136373,63	5,14
13.2	371,8	2,42	153636,36	5,19
14.1	374,8	6,7	559402,99	5,72
14.2	374,5	8	468125,00	5,67

Tabulka 7: Naměřené hodnoty se zesilovačem

Filtry	Filtr 3+3 (mW)	U _i (mW)	Opt. Hustota
8	59,43	0,0724	2,91
9	59,43	0,0186	3,5
10	59,43	0,0089	3,82
11	59,43	0,0036	4,22
12	59,43	0,0026	4,36
13	59,43	0,00072	4,92
14	59,43	0,000104	5,76

Tabulka 8: Měření optické hustoty s filtrem 3+3

Filtry	Filtr 3+4 (mW)	U _i (mW)	Opt. Hustota
8	205,4	0,3378	2,77
9	205,4	0,00888	3,36
10	205,4	0,0148	3,68
11	205,4	0,043	3,74
12	205,4	0,0037	4,14

Tabulka 9: Měření optické hustoty s filtrem 3+4

Filtry	Filtr 3+5 (mW)	U _i (mW)	Opt. Hustota
9	87,3	0,037	3,37
10	87,3	0,0181	3,68
11	87,3	0,0054	4,2
12	87,3	0,0017	4,71

Tabulka 10: Měření optické hustoty s filtrem 3+5

Filtr	Hustota	Napětí[mV]	Proud[mA]	Zářivý tok[mW]
3	0,88	401,200000	0,4045170	4,2184216
3+3	1,76	52,630000	0,0530651	0,5560963
3+4	2,12	22,100000	0,0222827	0,2427448
3+5	2,5	9,520000	0,0095987	0,1011929
3+3+3	2,64	7,110000	0,0071688	0,0733078
3+4+4	2,36	1,190000	0,0011998	0,1396851
3+3+5	3,37	1,270000	0,0012805	0,0136505
3+8	3,65	0,690000	0,0006957	0,0071639
3+5+5	4,1	0,220000	0,0002218	0,0025419
3+12	5,63	0,006650	0,0000067	0,0000750
3+14	6,55	0,000801	0,0000008	0,0000090
3+3+14	7,43	0,000105	0,0000001	0,0000012

Tabulka 11: Hodnoty pro linearitu hustoty

Odpor[Ω]	991,8
Zesílení[x]	100
Výkon laseru[mW]	32

Tabulka 12: Měření odporu fotodiody a výkonu laseru