

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA  
UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

Katedra optiky



# Linearita detekce světla

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Josef Hloušek

2013

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI  
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Katedra optiky



# Linearita detekce světla

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval:	Josef Hloušek
Studijní program:	B1701 Fyzika
Forma studia:	Prezenční
Studijní obor:	Optika a optoelektronika, 3. ročník
Vedoucí bakalářské práce:	Mgr. Miroslav Ježek, Ph.D.
Práce odevzdána dne:	.....

PALACKY UNIVERSITY IN OLOMOUC

FACULTY OF SCIENCE

DEPARTMENT OF OPTICS



# Photodetection linearity

BACHELOR THESIS

Author:

Josef Hloušek

Thesis supervisor:

Mgr. Miroslav Ježek, Ph.D.

Field of study:

Optics and Optoelectronics

## Abstrakt

V mnoha metrologických aplikacích a při pokusech sloužících k ověřování platnosti fundamentálních fyzikálních zákonů hraje linearita detekce světla důležitou roli. Pro tyto účely je zapotřebí mít k dispozici stále dokonalejší a přesnější měřicí přístroje. Od dokonalého lineárního detektoru požadujeme, aby detekovaný proud nebo napětí na výstupu bylo přímo úměrné optickému výkonu dopadajícího záření. Šum a saturace způsobují, že běžné detektory ve skutečnosti vykazují odchylky od linearitě řádově  $10^{-2}$  až  $10^{-4}$ . Snahou je dosáhnout zlepšení lineárního chování a pokořit pomyslnou hranici  $10^{-4}$ . Práce pojednává o vlivech různých parametrů na linearitu detekce světla. Naměřené závislosti umožňují zvolit jejich vhodné kombinace k vytvoření lineárnějších detektorů. Experimentální část práce obsahuje stručný popis měřícího uspořádání, které je vhodné pro měření odchylek od linearitě nižších řádů. Je třeba mít pod kontrolou všechny faktory limitující přesnost měření. Následuje diskuze jednotlivých částí experimentu. Výsledky ukazují, že průměr detekovaného optického svazku, záporné předpětí a zesilovač mají vliv na výslednou linearitu. Dále je v práci studována linearita jednofotonových detektorů.

## Klíčová slova

Linearita detekce světla, optický detektor, šum, saturace, PIN, APD, jednofotonový detektor.

## **Abstract**

In my thesis I study photodetection linearity. A photodetector is defined to be linear when the responsivity is constant. Any change of responsivity with optical power is defined as nonlinearity. Photodetectors are used for many measurements in various branches of industry and research. Linearity is a necessary property of a high-precision photodetector. Noise and saturation cause the photodetectors exhibit deviations from linearity worse than  $1 \times 10^{-4}$ . To reach such an accuracy, one must take into account a number of parameters. The optical setup for nonlinearity measurements is based on two-beams method. The entire measurement was PC controlled. The diameter of the measurement beam, reverse bias and gain were found to have an effect on the nonlinearity. In conclusion single-photon detector has been studied and found to be linear within  $1.5 \times 10^{-3}$ .

## **Keywords**

Photodetection linearity, photodetectors, noise, saturation, PIN, APD, single-photon detector.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Mgr. Miroslavu Ježkovi, Ph.D. za jeho čas, vstřícný přístup, odborné rady a věcné připomínky, které mi ochotně věnoval během řešení dané problematiky. Mé poděkování patří také kolegům z Laboratoře kvantové optiky a informatiky katedry optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci. Jmenovitě bych chtěl poděkovat Mgr. Martině Mikové, Mgr. Ivo Strakovi a Mgr. Michalu Mičudovi, Ph.D. za pomoc, kterou mi poskytli při práci v laboratoři.

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci „Linearita detekce světla“ napsal samostatně s použitím uvedené literatury. Souhlasím, aby byla práce použita pro potřeby výuky a prezentována na internetových stránkách katedry optiky.

V Olomouci dne .....

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Základní Pojmy</b>	<b>3</b>
2.1	Detektory intenzity světla . . . . .	3
2.1.1	Vlastnosti detektorů . . . . .	3
2.2	P-N přechod . . . . .	4
2.3	Fotodioda PIN . . . . .	5
2.4	Lavinová fotodioda (APD) . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Experiment</b>	<b>7</b>
3.1	Uspořádání experimentu . . . . .	7
3.2	Problémové faktory . . . . .	8
3.2.1	Interference . . . . .	8
3.2.2	Dělič svazku . . . . .	9
3.2.3	Fluktuace laseru . . . . .	10
3.3	Automatizace měření . . . . .	11
3.3.1	RC serva . . . . .	11
3.3.2	Programovatelný útlum . . . . .	13
3.3.3	Optické závěrky . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Měření</b>	<b>15</b>
4.1	Detektor s křemíkovou PIN fotodiódou . . . . .	15
4.1.1	Závislost linearity na fokusaci . . . . .	18
4.1.2	Závislost linearity na záporné předpětí . . . . .	20
4.1.3	Vliv zesilovače na linearitu detektoru . . . . .	21
4.2	Jednofotonový detektor (APD v Geigerově módu) . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>24</b>
	<b>Literatura</b>	<b>25</b>

# 1 Úvod

Fotodetektory vyrobené z křemíkové diody našly využití v mnoha aplikacích odvětví průmyslu a základního výzkumů. Využívají se k určování energetických a výkonových vlastností optického záření. Pro současné fotonické systémy jsou nezbytné fotodiody, jež vykazují lineární chování i v oblasti velkých optických výkonů. Chceme-li v dnešní době vyrobit vysoce přesné detektory intenzity světla, je třeba brát v úvahu mnoho parametrů, mezi nimiž je i lineární odezva detektoru v závislosti na optickém výkonu. O fotodetektoru můžeme říct, že vykazuje lineární chování, pokud je senzitivita konstantní. To znamená, že výstupní elektrický signál je přímo úměrný dopadajícímu optickému signálu. Tato vlastnost detektorů výrazně usnadňuje jejich používání a následné vyhodnocování naměřených výsledků. Všechny změny senzitivity v závislosti na optickém výkonu jsou brány jako nelinearita detektoru. Nelinearita křemíkových fotodiód je funkcí hned několika parametrů (velikosti dopadajícího svazku, generovaného fotoproudu, záporného předpětí...). Některými z nich se budu v této práci podrobně zabývat.

Současné detektory jsou schopny zaznamenat optické záření s odchylkou od linearity pouhých  $10^{-4}$  [1, 2]. Abychom mohli studovat chování linearity při změnách různých parametrů na této a vyšších úrovních linearity, je třeba navrhnout a následně zkonstruovat vhodné měřicí uspořádání. Pohybujeme-li se v oblasti tak přesných měření, je nezbytné mít pod kontrolou problémové parametry, které ovlivňují celkovou neurčitost měření. Neméně důležitou roli hraje výběr optických komponent. Záměrem je dokázat, že se dá dosáhnout zlepšení linearity pro zvolené měřicí uspořádání a že s ním můžeme snadno proměřit zkoumané závislosti linearity na vybraných parametrech.

Principem zvolené metody měření linearity je využití jednoho zdroje optického záření a jednoho detektoru intenzity světla, přičemž laserový svazek před dopadem na aktivní plochu detektoru rozdělíme na dva svazky, které střídavě zastíňujeme. Zvolenou metodu budu dále nazývat jako *dvousvazková metoda*. Oba svazky přivádíme na detektor pod stejným úhlem. Tato metoda je metodou absolutního měření. Na rozdíl od experimentu provedeného týmem profesora E. Ikonena [2], kde pro zkoumání nelinearity detektoru použili relativní metodu měření. Odezvu testovaného detektoru porovnávali s kalibračním detektorem.

Poslední součástí práce je měření nelinearity jednofotonového detektoru. Tyto detektory obecně vykazují linearitu pouhých  $10^{-2}$ . Hlavní myšlenkou experimentu je změřit odchylky od linearity jednofotonových detektorů pomocí dvousvazkové metody. Zvolené měřicí uspořádání umožňující zkoumat linearitu detektorů s neurčitostmi menšími než  $10^{-4}$  by mělo být více než postačující pro získání průběhu nelinearity v závislosti na počtu detekovaných událostí.



V práci nejdříve definuji základní pojmy a principy fotodetektorů, jež jsou důležité pro celkovou srozumitelnost a pochopení textu. Dále se zabývám stručným popisem měřícího uspořádání a použitých komponent. Následuje analýza a konstruktivní řešení problémů objevených během realizace experimentu. Nedílnou součástí práce je automatizace celého procesu měření, kde vysvětluji funkční principy a použití navržených komponent. Následně popisuji jednotlivá měření zkoumaných vlivů parametrů na linearitu detektoru. Celou práci uzavírám diskuzí výsledků měření, některé z nich porovnávám s předešlými publikacemi zabývajícími se danými závislostmi.

## 2 Základní Pojmy

### 2.1 Detektory intenzity světla

Detektory intenzity světla jsou zařízení sloužící pro převod optického signálu na elektrický, který je dále možno zpracovat a následně vyhodnotit. Absorbované fotony dávají vzniknout nosičům elektrického náboje, které svým pohybem v elektrickém poli vytváří elektrický proud. Velikost vyčítané veličiny na výstupu závisí na parametrech detekovaného optického záření. Optický signál detekujeme polovodičovými fotodiodami, fototranzistory a jinými fotocitlivými součástkami pracujícími na principu fotoelektrického jevu. V praxi jsou nejrozšířenější polovodičové detektory využívající PN přechod, PIN přechod a APD fotodiody.

#### 2.1.1 Vlastnosti detektorů

Vlastnosti optických detektorů jsou podrobně popsány v odborné literatuře [3, 4]. Z důvodu přehlednosti zde udávám pouze některé parametry, které v práci používám. Vycházel jsem z definic uvedených ve zdrojích [3, 4].

#### Senzitivita

Popisuje vztah mezi vyčítanou veličinou, typicky fotoproudem, a optickým výkonem dopadajícího záření na detektor,

$$S = \frac{I}{P}. \quad (1)$$

Jedná se o koeficient úměrnosti mezi danými veličinami. Závisí na vlnové délce optického záření a šířce ochuzené vrstvy.

#### Temný proud

Detektor registruje elektrický proud, nepravidelně kolísající kolem určité hodnoty, i v případě, kdy na něj nedopadá optické záření. Temný proud je způsoben náhodnými pohyby nosičů elektrického náboje (párů elektron – díra) v polovodičové součástce, které mají za následek fluktuaci odporu detektoru. Vzniká nezávisle na velikosti připojeného napětí a protékajícího proudu. Jeho hodnota je charakteristická pro materiál, ze kterého je polovodičová součástka vyrobená. Velikost nežádoucího proudu je teplotně závislá. Pozitivní vlastností temného proudu je, že je relativně malý a při stejných podmínkách konstantní.

## NEP

Z anglického výrazu noise equivalent power, jedná se tedy o optický výkon, který při dopadu na detektor vyvolává elektrický proud srovnatelný s temným proudem.

## Doba odezvy

Je časový interval mezi změnou hodnoty výstupního signálu při skokové změně intenzity optického záření dopadajícího na detektor. Závisí na velikosti kapacity P-N přechodu a je nepřímo úměrný šířce pásma detekovaného signálu.

## Linearita

Sebemenší změna dopadajícího optického výkonu na lineární detektor intenzity světla má za následek přímo úměrné zvýšení nebo snížení vyčítané veličiny na výstupu. Z principu můžeme tedy uvažovat použití jednoho laserového zdroje světla, jehož svazek rozdělíme na dva optické svazky. Z předpokladu lineárního detektoru se součet naměřených proudů/napětí takto získaných svazků musí rovnat proudu/napětí vyvolaného svazkem původním. Linearitu detektoru světla vyjadřují pomocí její odchylky, kterou definují následovně:

$$\varepsilon = \frac{I_A + I_B}{I_{AB}} - 1. \quad (2)$$

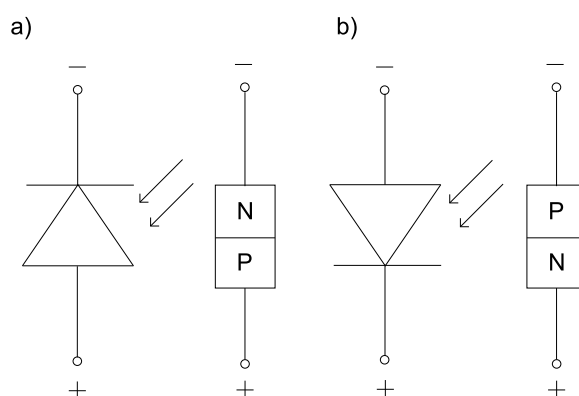
Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která udává míru nelinearity detektoru. Při malých výkonech řádu NEP dochází k porušení linearity i za konstantního temného proudu. Naopak v oblasti velkých výkonů dochází k saturaci a fotodioda ztrácí svou lineární odezvu.

## 2.2 P-N přechod

Podrobným popisem optických vlastností P-N přechodu se zabývá například práce [5], a proto uvedu jen stručný popis základního principu. P-N přechod vzniká kombinací dvou většinou stejných polovodičových materiálů s různým dopováním. Jedna část je dopovaná na vodivost typu N s dominantní koncentrací elektronů a druhá na typ P s dominantní koncentrací děr. Několika řádový rozdíl mezi koncentracemi příslušných nosičů vyvolá po spojení těchto polovodičů difúzi elektronů a děr. Nosiče se budou pohybovat z oblasti s vyšší koncentrací do oblasti nižších koncentrací. Proběhne částečná vzájemná rekombinace, čímž se v oblasti spoje vytvoří na jedné straně ionizované akceptory a na druhé straně ionizované donory. Toto rozložení nosičů má za následek vznik plošného náboje generující elektrické pole. V oblasti P-N přechodu je toto pole maximální. Přesouvající se náboje zvyšují vnitřní elektrické pole urychlující difúzi elektronů a děr. Po dosažení rovnováhy mezi elektrickým a difúzním proudem dojde k vytvoření potenciálového skoku koncentrace nosičů, který

zabrání další difúzi. Konečný elektrický potenciál má schodovitý průběh. P-N přechod se dostane do termodynamické rovnováhy a dále jím neprotéká elektrický proud.

Z důvodu nesymetrie se P-N přechod bude chovat rozdílně v závislosti na polaritě přiloženého napětí. Rozlišujeme tedy dvě zapojení. Přiložíme-li kladný pól zdroje k polovodiči typu P a záporný pól k polovodiči typu N, mluvíme o tzv. propustném směru. Změníme-li polaritu zapojení, mluvíme o tzv. závěrném směru. U součástky s P-N přechodem v tzv. propustném směru, dojde ke snížení vnitřního elektrického pole a zúžení oblasti plošného náboje. Přiložené napětí způsobí, že se polovodič již nebude nacházet v rovnovážném stavu. V oblasti přechodu dojde k nárůstu minoritních nosičů. Tyto nosiče budou znovu difundovat a součástí začne protékat elektrický proud. Opačný jev nastává při zapojení v závěrném směru. Elektrické pole polovodiče vzroste a oblast plošného náboje se rozšíří. Přechod nábojů přes rozhraní se tím podstatně ztíží. Vlivem neustálého neuspořádanému pohybu elektronů a děr teče přechodem velmi malý proud, jehož velikost je zanedbatelně malá ve srovnání s proudem protékajícím při zapojení v propustném směru. Ze závislosti na daném zapojení vyplývá, že součástka pracující na principu P-N přechodu propouští elektrický proud pouze jedním směrem.



Obrázek 1: Zapojení fotodiody: a) v propustném směru, b) v závěrném směru.

## 2.3 Fotodioda PIN

PIN fotodioda je plošná polovodičová dioda, na jejíž P-N přechod se nechá skrz okénko v pouzdru fotodiody pronikat světelné záření. Skládá se ze dvou polovodičů s různou příměsovou vodivostí (P a N), mezi které je vložena tenká nedopovaná vrstva z čistého

křemíku s vlastní vodivostí (I). V oblasti přechodu P-N se vytváří ochuzená vrstva, jejíž parametry jsou dány typem dopování daného materiálu a velikostí přiloženého závěrného napětí. S rostoucí šířkou ochuzené vrstvy roste pravděpodobnost detekce kvanta záření a zároveň se vlivem snížení kapacity P-N přechodu zkrátí doba odezvy.

V obvodu detektoru je PIN fotodioda zapojena pomocí elektrod (anody a katody), které jsou vůči sobě pólovány záporně. Polovodič typu P je připojen k zápornému pólu a N ke kladnému pólu zdroje. Dioda je zapojena v tzv. závěrném směru. V tomto uspořádání se negenerují nové nosiče náboje. Velikost záporného závěrného předpětí na diodě určuje přiložený zdroj napětí. Proud protékající diodou (temný proud) dosahuje řádově  $\mu\text{A} - \text{nA}$  a je závislý na materiálových parametrech použitého polovodiče. Zvýšení teploty diody zapříčiní nárůst tohoto temného proudu. V mnoha aplikacích se využívají pasivní chladiče k tepelné stabilizaci diody, které jsou schopny snížit hodnotu temného proudu.

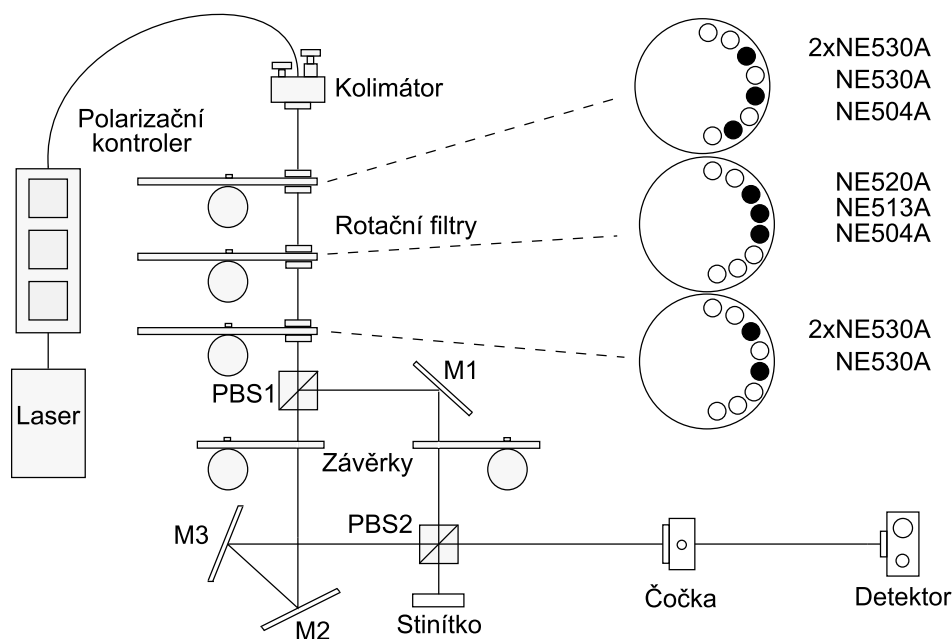
Skutečným principem fotodetektoru je účelně využívaná vlastnost diody, kdy při dopadu elektromagnetického záření na diodu zapojenou v závěrném směru začne obvodem protékat proud. Toto chování lze vysvětlit pomocí **vnitřního fotoelektrického jevu**. Foton dopadající na diodu, resp. na přechod P-N, interaguje s elektronem ve valenční vrstvě krystalové mřížky a předá mu svou energii. Pokud je absorbovaná energie dostatečně velká, elektron přejde z valenčního pásu do vodivostního a dále se volně pohybuje krystalovou mřížkou polovodiče. Na místě uvolněného elektronu vzniká díra (neobsazený elektronový stav). Vzniklé páry elektron-díra nesou elektrický náboj a mají za následek snížení elektrického odporu diody, resp. zvýšení elektrické vodivosti. Obvodem začne protékat proud lineárně rostoucí v závislosti na velikosti osvětlení.

## 2.4 Lavinová fotodioda (APD)

Z anglického avalanche photodiode, je fotodioda se závěrným napětím větším než průrazné napětí (řádově desítky až stovky voltů). Vzniká tak silné elektrické pole natolik urychlující elektrony, že jsou schopny dosahovat energií postačujících ke generaci dalších elektron-děrových párů. Tomuto procesu říkáme nárazová ionizace. Lavinová fotodioda v Geigerově módu se používá jako zařízení schopné detekovat jednotlivá kvanta elektromagnetického záření (fotony), v našem případě v blízké infračervené oblasti spektra. Jediný absorbovaný foton vyvolá lavinu pohybujících se párů nosičů, které vytvoří snadno detekovaný elektrický proud makroskopické úrovně. Přehled jednofotonových detektorů a jejich vlastností lze nalézt například v práci [6].

## 3 Experiment

### 3.1 Uspořádání experimentu



Obrázek 2: Schéma optického uspořádání pro měření linearity.

Na obrázku 2 je znázorněno schéma měřícího uspořádání. Jako zdroj byla použita laserová dioda QFLD-810-10S o centrální vlnové délce 810 nm s teplotní a proudovou stabilizací LDC202C+TED200C (Thorlabs). Jednovidovým optickým vláknem 780-HP je optický signál doveden přes polarizační kontroler do kolimátoru s asférickou čočkou o ohniskové vzdálenosti 11 mm a s numerickou aperturou 0,25 (Schäfter-Kirchhoff 60FC-0-A11-02). Odtud je vyvázán do prostoru v podobě kolimovaného optického svazku s pološířkou přibližně 1 mm. Průchodem přes rotační soustavu s absorpčními filtry s různou hodnotou propustnosti dochází k postupné atenuaci výkonu. Po dopadu na polarizační dělič PBS1 (CVI PBS - 810 - 050) se svazek separuje na dva paralelní svazky se vzájemně kolmou polarizací typu S (vertikální) a P (horizontální). Mezi získané svazky dále zavedeme soustavou zrcátek dráhové rozposunutí mnohem větší, než je koherenční délka použitého zdroje. Takto vzniklý rozdíl v polarizaci a v optických drahách snižuje schopnost svazků spolu interferovat. Svazek A po rozdělení dopadá na zrcátko M1, od kterého se odráží na

druhý polarizační dělič PBS2. Svazek B postupně dopadá a odráží se na zrcátkách M2 a M3. Mechanické závěrky umístěné mezi polarizační dělič PBS1 a PBS2 střídavě propouští a zastiňují laserové svazky. Na polarizačním dělič PBS2 se svazky znovu setkávají a postupují koaxiálně daným směrem. Svazky na detektor fokusujeme pomocí plankonvexní čočky s ohniskovou vzdáleností 200 mm. Před dopadem na aktivní plochu detektoru svazky prochází přes optické filtry (Semrock BLPO1-635R-25, EK SMA HP cut-off 750 nm), které slouží jako horní propust pro vlnové délky. Zamezí se tak nežádoucím příspěvkům intenzit od jiných zdrojů záření.

## 3.2 Problémové faktory

### 3.2.1 Interference

Optické uspořádání pro měření linearitu detekce světla na obrázku 2 může na první pohled připomínat interferometr. Opak je však pravdou. V našem případě jde o zamezení interference dvou světelných svazků. Stejně jako lidské oko tak i detektor zaznamenává intenzitu světla. Vlnová povaha elektromagnetického záření má za následek prostorovou modulaci intenzity světla při skládání dvou nebo více svazků [7].

Pomocí vztahu pro komplexní amplitudu výsledného pole:

$$\vec{E}_0(\vec{r}) = \vec{E}_0 \exp[i\phi(\vec{r})], \quad (3)$$

definujeme intenzitu světla následovně:

$$I(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r})\vec{E}_0^*(\vec{r}). \quad (4)$$

Pro intenzitu světla dvou optických svazků v určitém místě získáváme vztah:

$$I(\vec{r}) = I_1 + I_2 + \vec{E}_{01}(\vec{r})\vec{E}_{02}^*(\vec{r}) + \vec{E}_{02}(\vec{r})\vec{E}_{01}^*(\vec{r}), \quad (5)$$

tedy

$$I(\vec{r}) = I_1 + I_2 + 2\text{Re} \left\{ \vec{E}_{01}(\vec{r})\vec{E}_{02}^*(\vec{r}) \right\} = I(\vec{r}) = I_1 + I_2 + 2\vec{E}_{01}\vec{E}_{02} \cos(\phi_2 - \phi_1). \quad (6)$$

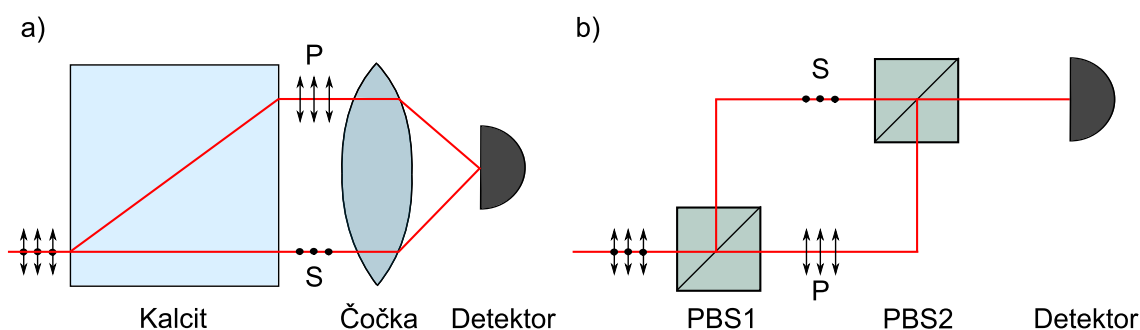
Výsledná intenzita dvou svazků je rovna součtu intenzit jednotlivých svazků s interferenčním členem, jehož velikost závisí na kosinu fázového rozdílu a skalárním součinu velikosti reálných amplitud. Proto optický svazek na polarizačním dělič rozdělujeme na dva svazky s vzájemně kolmou polarizací. Díky tomu interferenční člen vymizí.

Interferenci světla můžeme pozorovat u svazků se vzájemným dráhovým rozdílem menším než je koherenční délka použitého zdroje,

$$L = \frac{2 \ln 2 \lambda^2}{\pi \Delta \lambda}. \quad (7)$$

Na základě tohoto faktu zavádíme pro náš zdroj s koherenční délkou  $L = 0,12$  mm dráhový rozdíl  $l = 35,4$  mm,  $l \gg L$ . Kombinací dráhového rozdílu a kolmostí polarizací dvou svazků bráníme jejich vzájemné interferenci.

### 3.2.2 Dělič svazku



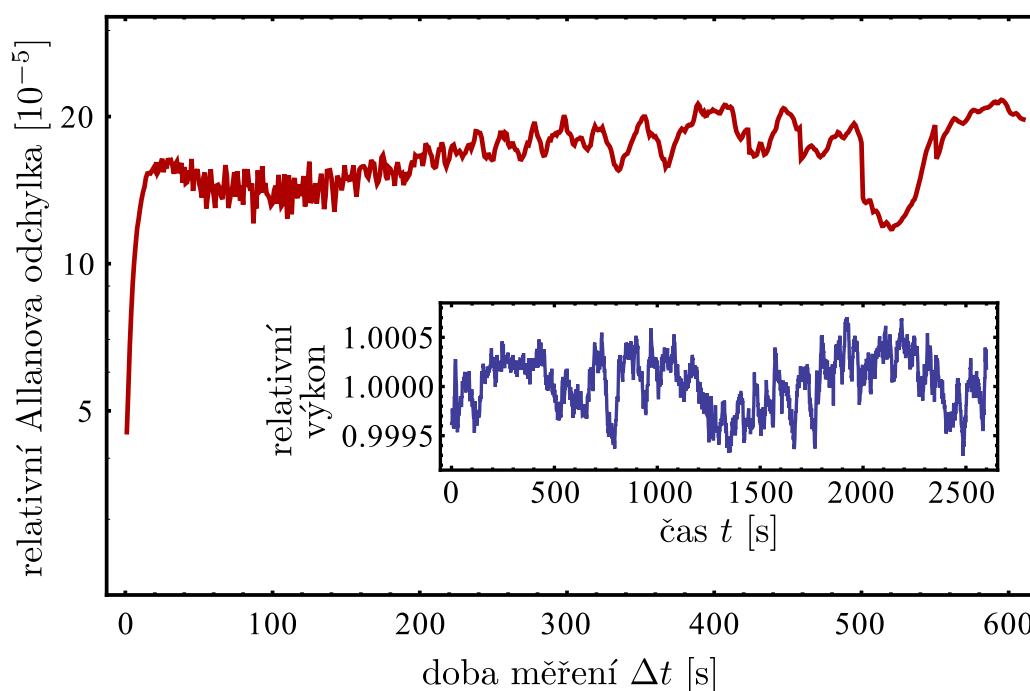
Obrázek 3: Geometrie rozdělení svazku: a) dvojlomný kalcit, b) PBS.

Existuje mnoho optických elementů sloužících k dělení světelných svazků. Pro moji aplikaci jsem se zabýval děliči závislými na polarizaci (důvody jsem zmínil v sekci 3.2.1). Pro první měření jsem použil krystal kalcitu. Zvolený dělič BD40 využívá dvojlomu k rozdělení dopadajícího svazku na dva rovnoběžné svazky s polarizací S (vertikální) a P (horizontální) s extinkčním poměrem 100000:1 a vzájemnou vzdáleností 4 mm. Získaná geometrie vykazovala hned několik problémů. V měřicím uspořádání způsoboval kalcit nežádoucí odrazy (použitý vzorek navíc neměl antireflexní povrstvení), které znehodnotily přesnost měření. Odstup svazků pouhých 4 mm se ukázal jako nevyhovující pro jejich přepínání bez vzájemného ovlivňování (viz v sekci 3.3.3). Rozdělené svazky navíc musíme na detektor usměrňovat čočkou, což znamená, že na detektor dopadají pod úhlem. Všechny tyto komplikace mě nakonec donutily zvolit jinou geometrii experimentu. Kombinace polarizačních dělicích kostek PBS (polarizing beam splitter) vyřešila prvotní problémy. Polarizační kostky fungují na principu odrazu S polarizace a průchodu P polarizace. Nevykazují tak velký extinkční poměr (1000:1), za to však umožňují svazky od sebe dostatečně vzdálit a svou kombinací zajistit kolmý dopad na detektor.



### 3.2.3 Fluktuační laseru

Fluktuační optického výkonu použitého zdroje se projeví jako limitující faktor přesnosti měření. Změny hodnot optického výkonu během zastiňování jednotlivých svazků ve výsledku zhorší získané odchylky od linearity. Požadujeme proto, aby optický výkon zůstal konstantní pro všechna tři měření v sérii. To však bohužel není z fyzikálního hlediska realizovatelné. Daný problém ošetříme nalezením vhodné kombinace rychlosti vyčítání a počtu opakování. Pokud měření dostatečně dlouho opakujeme, získáme statistický soubor dat, který redukuje chyby způsobené fluktuacemi. Na druhou stranu sérii tří po sobě jdoucích měření je zapotřebí omezit na časový úsek, na kterém se fluktuační zdroje projeví jen minimálně. Je zřejmé, že k určení této časové konstanty je nutnou podmínkou proměření fluktuací optického výkonu v závislosti na čase.



Obrázek 4: Fluktuační optického výkonu laserové diody QFLD-810-10S SN:101246 (QPhotonics) s proudovým a teplotním kontrolerem LDC202C+TED200C (Thorlabs) vyjádřená pomocí relativní Allanovy odchylky (červená křivka). Pro měření o délce 1–2 s je stabilita výkonu lepší než  $5 \cdot 10^{-5}$ , tj. 0.05%. Pro delší měření jsou odchylky výkonu menší než 0.2%. Vložený graf znázorňuje měřenou relativní hodnotu výkonu (modrá křivka).

Výsledky měření stability laserové diody jsou znázorněny na obrázku 4. Optický výkon laserové diody byl periodicky měřen PIN fotodiodou DET36A a výsledný fotoproud zaznamenan multimetrem Hameg HM8112-3. Ze získaných dat byla vyhodnocena Allanova variace [8] s využitím již hotového programu *allan.c* [9]. Program je k dispozici na přiloženém CD. Z průběhu fluktuací laseru je vidět, že s délkou intervalu měření roste i směrodatná odchylka. Vyhovujícím řešením by bylo zkrátit časový interval na dobu trvání 1 s. Zde jsme ale omezeni časem potřebným pro vyčítání z multimetru a časové prodlevy, která je nezbytná pro pohyb závěrky. Vyzkoušel jsem celkem dva měřící přístroje. Prvním byl multimetr TTi 1906. Tento měřící přístroj poskytuje výsledné hodnoty s rozsahem šesti míst, jež je schopen dodat za 0,5 s. Jako druhý testovaný multimetr jsem použil Hameg HM8112-3. Oproti multimetru TTi disponuje Hameg jedním vyčítaným místem navíc. Takové přesnosti měření dosáhneme podle výrobce s minimální dobou měření 1 s. To znamená 3 s pro sérii třech měření potřebných pro vyhodnocení nelinearity. Při práci s multimetrem jsem dále narazil na technický problém. Přístroj na místo zvolené režie pracoval se stoprocentním nárůstem integrační doby (2 s/měření), a proto v konečném důsledku zvětšoval odchylky od linearity. Musel jsem se tedy spokojit s přesností multimetru TTi.

Pro zajištění, že se optické závěrky dostanou z jedné polohy do druhé a neovlivní svým pohybem započaté měření, je nutné zpoždění minimálně 0,3 s včetně režie komunikace. Celkově tak pro tři měření v sérii dostáváme časový interval roven 2,4 s, což je nejmenší možná hodnota, které se mi podařilo dosáhnout. S touto rychlostí vyčítání jsem provedl několik měření pro různé počty opakování. Výsledné odchylky od linearity a jejich směrodatné odchylky zůstaly nezměněny v rozmezí 20 až 60 opakování. Z ohledem na tyto výsledky a z důvodu časové úspory jsem zvolil 30 opakování na jednu hodnotu výkonu. Celková doba jednoho měření se tedy ustálila na 45 minut. S tímto časem jsem schopen spolehlivě dosáhnout hodnot neurčitostí měření pro dané odchylky od linearity řádově  $10^{-5}$ .

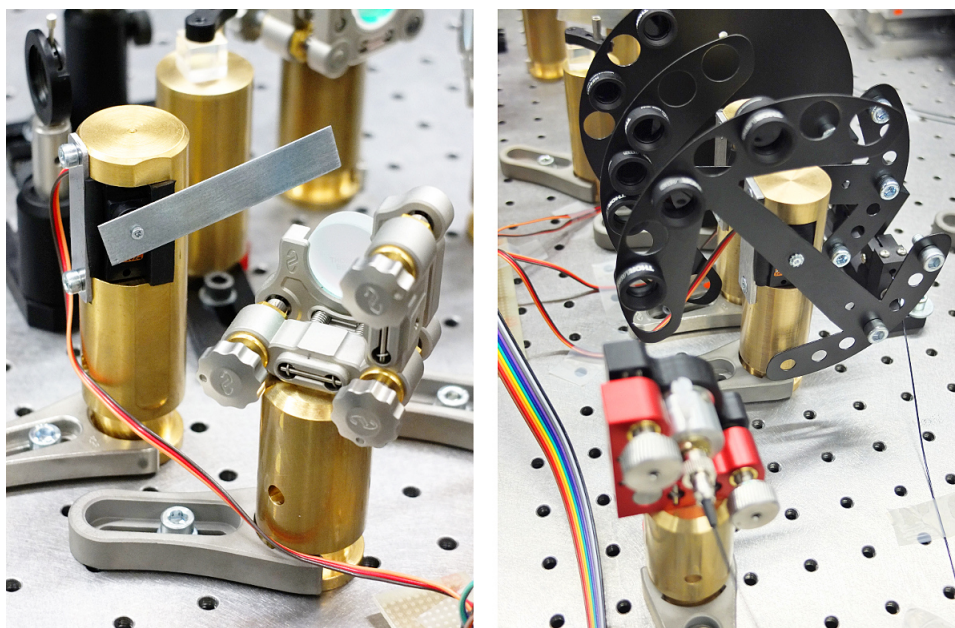
### 3.3 Automatizace měření

#### 3.3.1 RC serva

RC serva jsou dálkově ovládané motory primárně určené k přesnému řízení úhlu natočení osy. Pro jejich dostupnost, spolehlivost a jednoduchost ovládání jsou oblíbená a hojně využívaná v rádiově řízených modelech automobilů, letadel, lodí apod. Svoje uplatnění si však vydobyla i na poli robotiky. Do serva vysíláme elektrický impuls o určité šířce, který je elektronikou uvnitř vyhodnocen a převeden na rotační pohyb. Šířka signálu udává stupeň pootočení osy motoru. Pro svou aplikaci jsem potřeboval celkem pět digitálních mikro serv

SH-0262MG od firmy Savox. Toto servo je výhodné nejen cenově, ale i poměrem velikosti (23 x 12 x 25 mm) a maximální rychlosti (1°/ ms) při napájení 6 V. Lze nalézt serva schopná vyvinout větší rychlosti, ta však nabývají jak na rozměrech, tak na ceně. Servo Savox SH-0262MG nabízí provozní rotaci v úhlovém rozsahu 0° – 90°, která se ukázala pro naše účely zcela postačující. V atenuačním systému je zapotřebí maximálního pootočení o velikosti 75° a při zastiňování optickými závěrkami je to pouhých 15°.

K ovládání RC serv jsem použil vývojovou desku Arduino Uno s mikroprocesorem ATmega328. Mikroprocesor je vybaven 14 digitálními porty, které mohou být nastaveny jako vstupní či výstupní. Arduino Uno dále obsahuje FDTI čip umožňující komunikovat sériovým RS232 protokolem přes USB rozhraní. Program zavedený v paměti mikroprocesoru nastaví potřebné digitální výstupy pro porty, ke kterým připojuji serva. Program čeká příkaz na sériovém rozhraní udávající číslo digitálního výstupu (serva) a úhel pootočení. Následně je na příslušný digitální výstup zaslán TTL impuls s odpovídající dobou trvání. Úhlu 0° odpovídá 1000 us, maximálnímu úhlu pak 2000 us. Jednoduché ovládání pomocí speciálního jazyka (odvozeného od jazyka C) a pohodlné zapojení bylo hlavním důvodem pro zvolení této komponenty.



Obrázek 5: Sestavené optické komponenty využívající RC serva.

### 3.3.2 Programovatelný útlum

Za účelem proměření širokého spektra měřených výkonů jsem navrhl systém rotačních kotoučů s vestavěnými absorpčními filtry, které vhodnou kombinací vzájemných poloh vůči sobě postupně utlumí výkon až o deset řádů. Každý kotouč je připevněn k RC servu, které uvádí atenuační systém do chodu. Sestava se skládá celkem ze tří kotoučů a deseti filtrů.

Rotační kotouče primárně slouží jako konstrukce pro uchycení filtrů. Svými rozměry jsou dost objemné pro využití co největšího počtu filtrů, ale zároveň nemají příliš velkou hmotnost z důvodu použití RC serv jako rotačních motorů. K omezení nežádoucího namáhání šroubů, kterými jsou kotouče k servům přišroubovány, byl naprogramován chod RC serv jako postupný rotační pohyb s krokem  $2^\circ$ . S ohledem na to, že je svazek z laseru do prostoru vyvázán ve výšce 90 mm nad optickým stolem, jsem použil kotouče s poloměrem 70 mm. Do takto velkých kotoučů se při pohybu RC serva ( $0^\circ - 90^\circ$ ) dá snadno umístit celkem osm půlpalcových filtrů. Sestavený atenuační systém je flexibilní pro mnohé aplikace.

Pro svou aplikaci jsem použil půlpalcové absorpční ND (neutral density) filtry, jež modifikují optickou intenzitu. ND filtry nejsou dokonalé a nesnižují intenzitu pro všechny vlnové délky stejně, proto jsem pro zdroj s centrální vlnovou délkou 810 nm vybíral filtry s vyhovující frakční propustností. Jmenovitě jsem použil čtyři typy absorpčních ND filtrů s frakční propustností 45%(NE504A), 7,5%(NE513A), 4,2%(NE520A) a 0,92%(NE530A) pro danou vlnovou délku zdroje. Vhodnou kombinací zvolených filtrů jsem schopen získat postupný útlum v podobě: 45%, 20%, 7,5%, 3,3%, 1,9%, 0,92%. Pro větší kroky útlumu výkonu řádově  $10^{-2}, 10^{-4}, 10^{-6}$  slouží kombinace filtrů s propustností 0,92%. K důkladnému proměření jednotlivých oblastí výkonů jsem zvolil dostatečně jemný krok atenuace, díky kterému získáme odpovídající množství naměřených odchylek od linearity. Jsme tak schopni podrobně zaznamenat chování nelinearity detektoru v celém spektru výkonů.

### 3.3.3 Optické závěrky

Přepínání jednotlivých svazků je jeden z hlavních požadavků dvousvazkové metody měření linearity detektoru. Důležité je úplně a dostatečně rychle blokovat průchod svazků. Jako vyhovující řešení se ukázalo použití optických závěrek poháněných RC servy. K RC servu je šroubem přichycená optická závěrka sloužící k zastavení průchodu svazku. Jelikož se při měření nelinearity snažíme dostat pod hodnotu odchylky menší než  $10^{-4}$ , je plochu závěrky nutné navrhnout tak, aby byla schopna pohltnout více jak 99,9999% výkonu svazku. Řešením daného problému chceme získat vzájemný vztah mezi poloměrem plochy závěrky  $R$  a pološířkou Gaussova svazku  $\omega(z)$ .

Optická intenzita Gaussovského svazku je dána jako funkce osové vzdálenosti  $z$  a radiální vzdálenosti  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,

$$I(R, z) = C(z) \exp(-2r^2/\omega(z)^2). \quad (8)$$

Výkon optického záření intenzity  $I(r, z)$  dopadající na plochu o poloměru  $R$  lze vyjádřit

$$P_R = \int_0^{2\pi} \int_0^R \exp(-2r^2/\omega(z)^2) r dr d\varphi = \frac{1}{2} \pi \omega(z)^2 \{1 - \exp(-2R^2/\omega(z)^2)\}. \quad (9)$$

Pro  $R \rightarrow \infty$  získáváme celkový výkon  $P_{Cel}$  přenášený Gaussovým svazkem,

$$P_{Cel} = \frac{\pi \omega(z)^2}{2}. \quad (10)$$

Dáme-li do poměru velikost dopadajícího výkonu s celkovou velikostí přenášeného výkonu, získáme vyjádření procentuálního zastínění výkonu svazku:

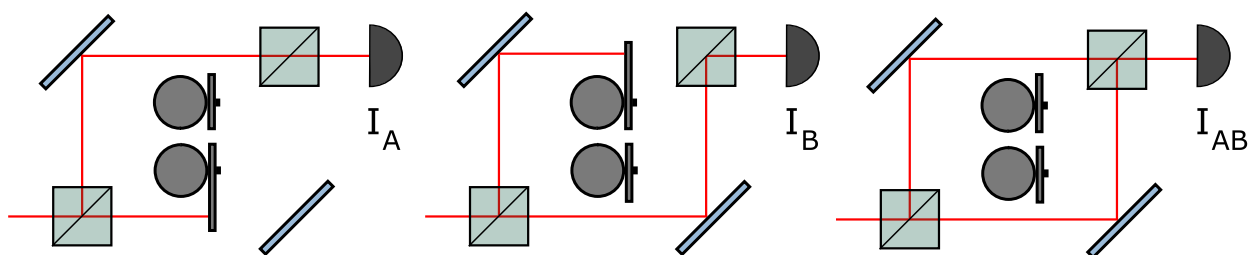
$$\frac{P_R}{P_{Cel}} = \{1 - \exp(-2R^2/\omega(z)^2)\}. \quad (11)$$

Z daného výsledku již můžeme vyvodit konečné řešení daného problému. Aby docházelo ke ztrátám dopadajícího výkonu menším než  $10^{-4}$ , musí být poloměr plochy minimálně 2,2krát větší než je pološířka svazku v rovině dopadu. V naší aplikaci je kolimovaný Gaussův svazek s pološířkou 1,03 mm usměrněn na plochu závěrky. Závěrka je zhotovena z 0,5 mm tenkého ocelového plechu s rozměry 15 x 70 mm. Šířka závěrky je však stále dostatečně malá pro dosažení krátkých časů přepínání mezi svazky.

## 4 Měření

### 4.1 Detektor s křemíkovou PIN fotodiodou

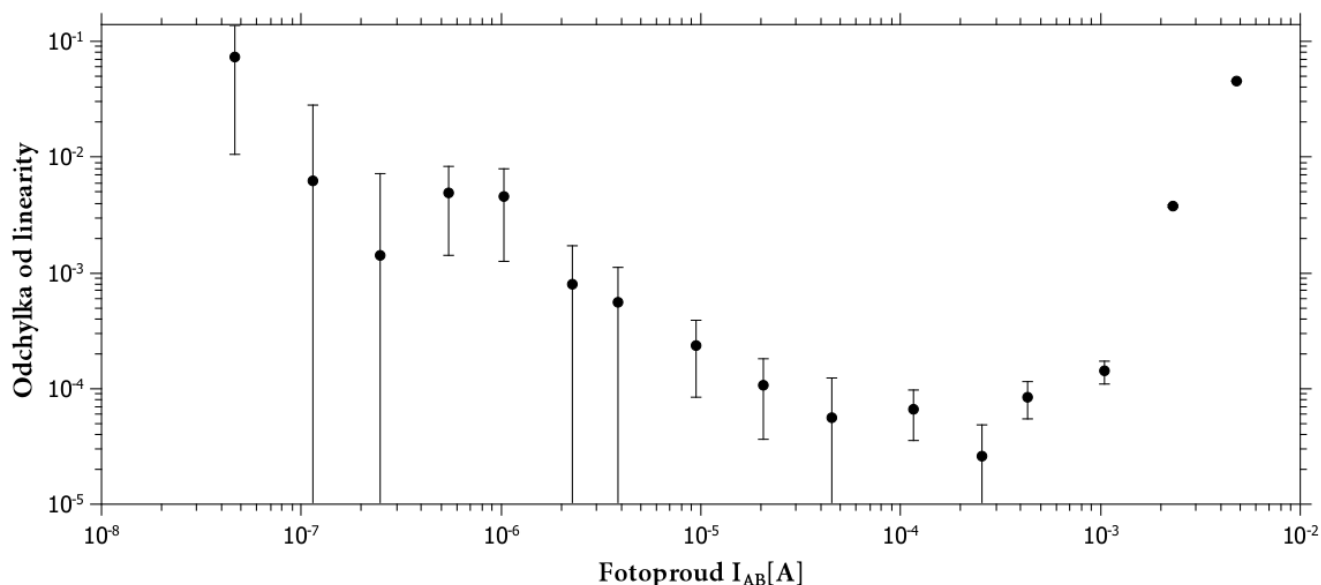
Jednotlivé vlivy různých parametrů na výslednou linearitu křemíkových fotodetektorů jsem proměřil na měřícím uspořádání popsaném v sekci 3.1. Jedná se o dvousvazkovou metodu při níž se laserový svazek rozdělí na dva přibližně stejné paralelní svazky. Mechanické závěrky střídavě přepínají separované svazky a to tak, že dostaneme sérii tří měření, jež jsou znázorněna na obrázku 6. V prvním případě necháme procházet svazek A a svazek B zastíníme pomocí závěrky (detekujeme odezvu  $I_A$ ). Poté závěrkami přepneme svazky a detekujeme odezvu svazku B ( $I_B$ ). Poslední třetí měření spočívá v detekci odezvy vyvolanou oběma svazky A a B ( $I_{AB}$ ). Z naměřených hodnot počítám odchylku od linearity pomocí vztahu 2. Dokonalý lineární detektor by dosahoval hodnoty  $\epsilon = 0$ .



Obrázek 6: Schéma principu série tří měření odchylky od linearity.

Použitá laserová dioda QFLD-810-10S je schopna svítit na vlnové délce 810 nm o maximálním optickém výkonu necelých 8 mW na výstupu optického vlákna. Postupným utlumením výkonu jsem schopen získat fotoproudy v rozmezí 4 mA až 40 nA. Výsledné odchylky od linearity vynáším v závislosti na detekovaném fotoproudu. Z důvodu lepší názornosti neurčitostí odchylek od linearity převádím obě osy do logaritmické škály. Do grafu vynáším absolutní hodnoty odchylek od linearity. Záporných hodnot jsem při měření dosahoval pouze ve středních hodnotách výkonů, tudíž logaritmické škálování nezmění obecný průběh daných závislostí. Zobrazené neurčitosti reprezentují standardní směrodatné odchylky opakovaně měřených odchylek od linearity. Celkový čas měření jednotlivých závislostí se pohybuje kolem 45 minut. Pro tyto časy jsem schopen získat neurčitosti o velikosti  $10^{-5}$ .

Měření nelinearity jsem prováděl na detektoru DET36A od firmy Thorlabs. Jedná se o křemíkovou PIN fotodiodu s aktivní plochou o velikosti 3,6 x 3,6 mm a záporným předpětím 12V. Detektor je možné použít pro optické svazky s vlnovou délkou v rozsahu 350 - 1100 nm. Výrobce udává, že temný proud detektoru v nejhorším případě nabývá hodnoty 6 nA.



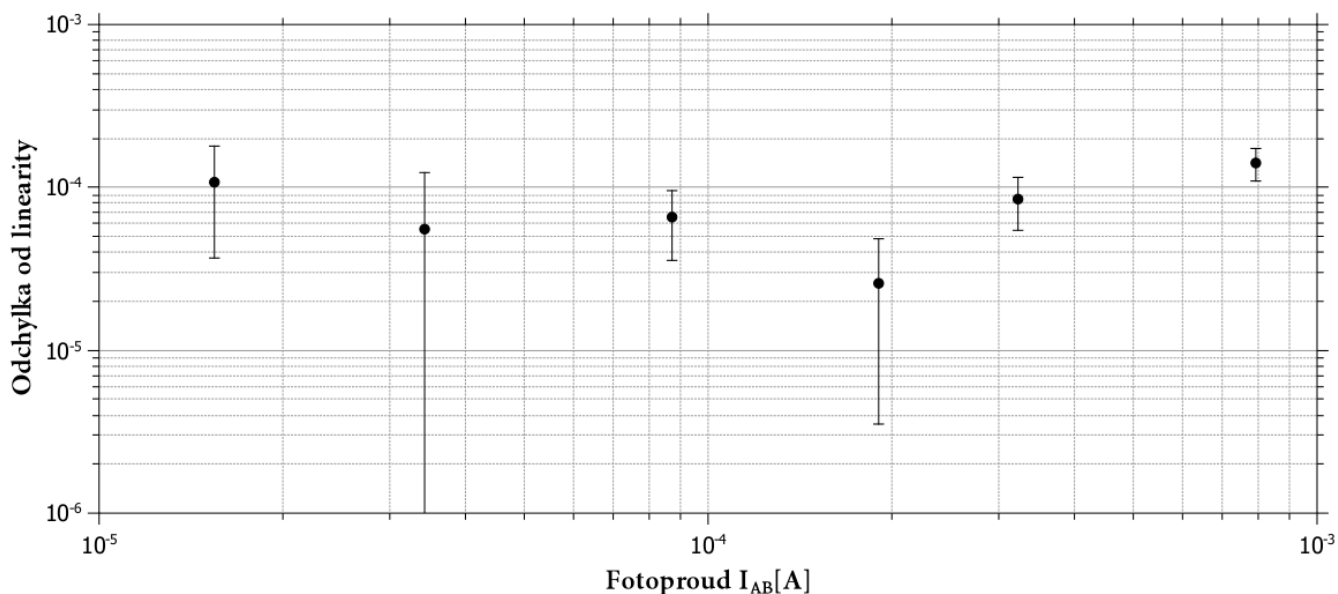
Obrázek 7: Nelinearita detektoru DET36A (křemíková PIN fotodioda).

Na obrázku 7 je zobrazeno vyhodnocení finálního měření odchylek od linearity daného detektoru. Průběh závislosti odchylek od linearity na optickém výkonu (generovaném fotoproudu) můžeme rozdělit na tři oblasti. Odchyłky od linearity pro malé fotoproudy (řádově jednotky  $\mu\text{A}$  až desítky nA) postupně narůstají. Tento jev se dá obecně vysvětlit tak, že při snižování optického výkonu detekujeme stále menší a menší hodnoty fotoproudu, až se začne projevovat šum detektoru (narůstá NEP). Temný proud podle výrobce dosahuje hodnoty 0,35 nA (max 6 nA). V našem případě se ale nedostaneme na úroveň fotoproudů, kde by se primárně projevil šum detektoru. Hlavním důvodem zhoršení měřené nelinearity je omezený rozsah měřícího přístroje. Pokles počtu využitých platných cifer multimetru výrazně zhoršuje přesnost měření. Naopak u velkých fotoproudů dosahujících hodnot mA a více se začne projevovat saturace. Velký optický výkon laserového svazku dopadajícího na detektor vyvolá generaci velkého množství párů elektron - díra. V daném místě polovodiče vzroste hustota nosičů náboje a tím i pravděpodobnost rekombinace. Nosiče, které nestačí být odvedeny do obvodu detektoru, spolu rekombinují a dochází k poklesu signálu na výstupu. Detektor není schopen odezvy odpovídající optickému výkonu.

Detektor vykazuje nejlepší linearitu v oblasti fotoproudů 15 - 800  $\mu\text{A}$ . Nejmenší odchylky od linearity naměřené v tomto intervalu dosahovaly velikosti  $3 \cdot 10^{-5}$  se směrodatnou odchylkou stejného řádu. Přesné číselné hodnoty pro různé fotoproudy jsou uvedeny v tabulce 1. Pro názornost jsou na obrázku 8 vyhodnoceny nejlepší naměřené odchylky od linearity. Navrženým měřicím uspořádáním jsem se dokázal dostat pod pomyslnou hranici  $10^{-4}$  a jsem tak schopen proměřovat chování linearity detektorů s vysokou přesností.

$I_{AB} [\mu\text{A}]$	791,66	322,92	191,00	87,10	34,20	15,50
$\epsilon [10^{-5}]$	14,18	8,45	2,58	6,59	5,56	10,75
$\delta\epsilon [10^{-5}]$	3,17	2,98	2,23	3,02	6,82	7,13

Tabulka 1: Nejmenší číselné hodnoty naměřených odchylek od linearity pro dané fotoproudy.

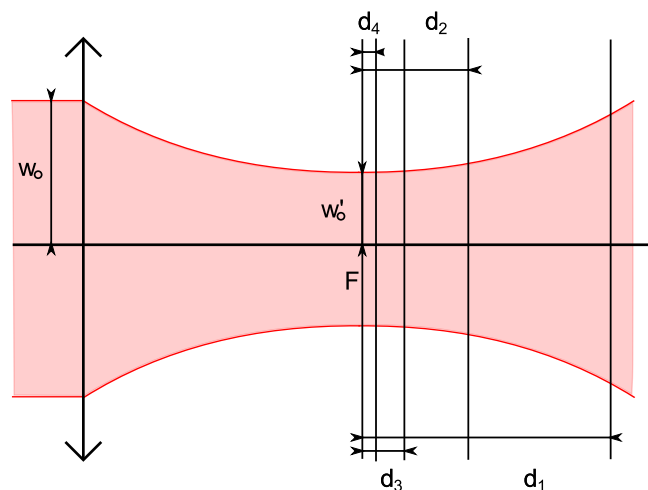


Obrázek 8: Oblast fotoproudů v rozmezí  $10\mu\text{A}$  až  $1\text{mA}$ , pro kterou detektor DET36A vykazuje nejlepší linearitu. Fotoproud na výstupu byl vyčítám multimetrem TTI 1906.



### 4.1.1 Závislost linearity na fokusaci

V následující části se budu zabývat vlivem fokusace optického svazku na linearitu fotodetektoru. Průměr dopadajícího svazku jsem reguloval pomocí vzájemné pozice čočky a detektoru.



Obrázek 9: Pozice rovin aktivní plochy detektoru.

Pološířka pasu kolimovaného optického svazku  $\omega_o = 1,03$  mm je po průchodu čočkou s ohniskovou vzdáleností  $f = 200$  mm transformována podle vztahu:

$$\omega'_o = \frac{\omega_o}{\sqrt{1 + \frac{g_o^2}{f^2}}}, \quad (12)$$

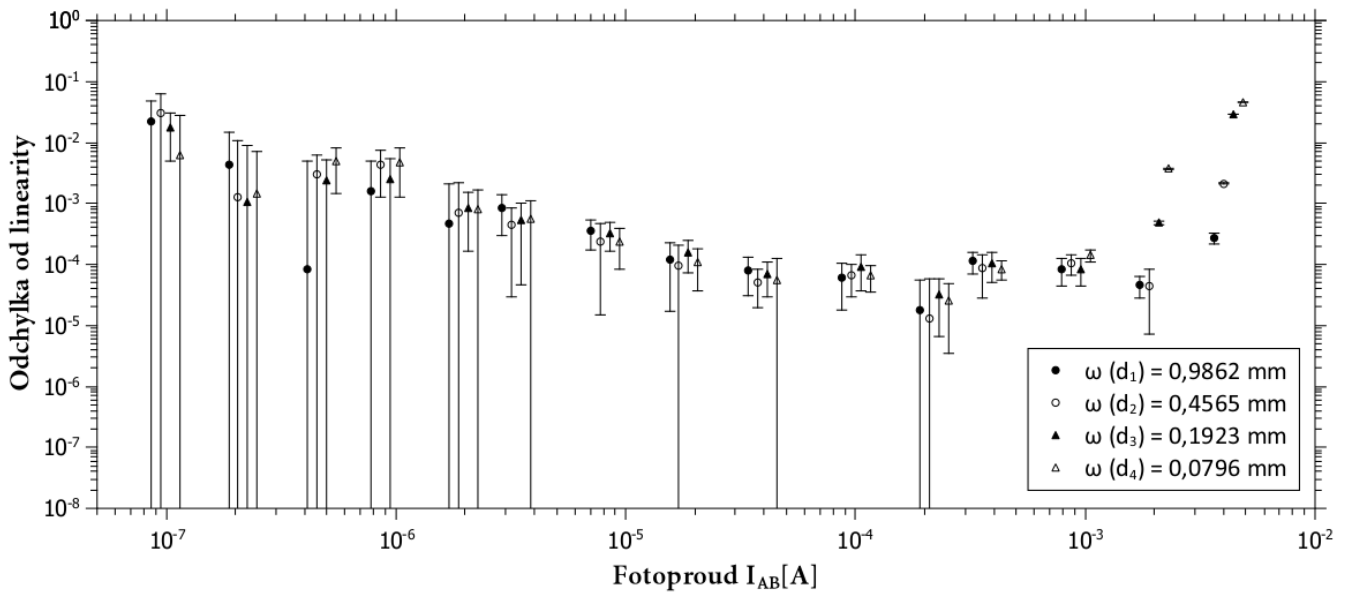
kde

$$g_o = \frac{\pi\omega_o^2}{\lambda}. \quad (13)$$

Výsledná pološířka pasu fokusovaného svazku je  $\omega'_o = 0,05$  mm. Pološířka laserového svazku v rovině ve vzdálenosti  $d$  od roviny pasu fokusovaného svazku je rovna:

$$w(d) = \sqrt{\frac{\pi^2\omega_o^4 + d^2\lambda^2}{\pi^2\omega_o^2}}. \quad (14)$$

Při posunech detektoru vůči čočce jsem využil otvory optického stolu s roztečí 25,0 mm. Detektor jsem tedy umístil postupně 191 mm, 88 mm, 36 mm a 12 mm od roviny pasu fokusovaného svazku. Přesnost umístění detektoru odhaduji na  $\pm 1$  mm.



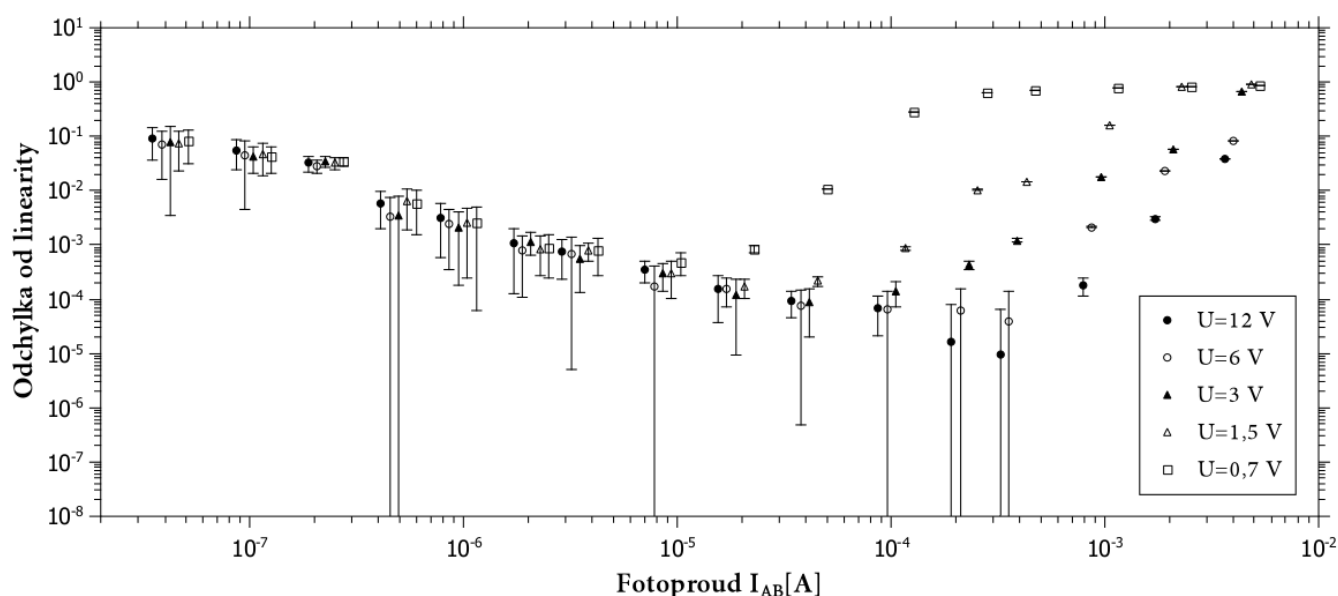
Obrázek 10: Závislost linearity na velikosti dopadajícího svazku měřená pro detektor DET36A od firmy Thorlabs. Fotoproud vyčítán multimetrem TTi 1906.

Ze získaných dat zobrazených v grafu 10 vidíme, že v oblastech malých a středních fotoproudů jsou odchylky od linearity pro různé velikosti optického svazku téměř nerozlišitelné. Můžeme proto konstatovat, že v oblastech výkonů menších než 1 mW je linearita detektoru nezávislá na parametrech dopadajícího optického svazku. U fotoproudů o velikostech  $10 \mu\text{A}$  až 1 mA se odchylky od linearity dostaly na hodnoty  $3 \cdot 10^{-4}$  se směrodatnou odchylkou stejného řádu. V tomto rozmezí fotoproudu se detektor chová lineárně. Při zvyšování optického výkonu (jednotky mW) dochází k rychlé saturaci. V oblasti velkých výkonů detektor vykazuje lepší linearitu pro optické svazky s větším průměrem. Svazky s menší pološířkou v rovině aktivní plochy fotodiody dopadají na detektor s větším procentuální zastoupením celkového optického výkonu (podle vztahu 11). Přenášený optický výkon koncentrován na menší část aktivní plochy detektoru způsobuje nárůst počtu nosičů elektrického náboje v daném místě polovodičové fotodiody. Detektor není schopen odvést tak velké množství generovaných nosičů náboje, a proto dochází k jejich zpětné rekombinaci, což vede ke snížení detekovaného signálu. Zvětšení poloměru paprsku vede k posunutí oblasti saturace k vyšším hodnotám fotoproudu. Linearita detektoru intenzity světla je závislá na plošné hustotě výkonu. Tato výsledná závislost je v souladu s výsledky publikace [2].

### 4.1.2 Závislost linearity na záporné předpětí

U fotodiody zapojené ve fotovodivostním režimu, tedy s přiloženým napětím v závěrném směru, se obecně při zvyšování velikosti záporného předpětí zvětšuje velikost ochuzené vrstvy, klesá kapacita P-N přechodu a tím se snižuje i doba odezvy detektoru. Šum je záporným předpětím zvýšen jen nepatrně [10].

Abych proměřil závislost odchylky od linearity na velikosti záporného předpětí i pro jiné hodnoty napětí, musel jsem odpojit 12V baterii danou výrobcem. Místo ní jsem detektor napájel z regulovatelného zdroje napětí PL303-P od firmy TTI s rozsahem 0 - 30 V a stabilitou výstupu lepší než 0,01% + 2 mV. Záporné předpětí jsem postupně měnil z původních 12 V až na hodnotu 0,7 V.

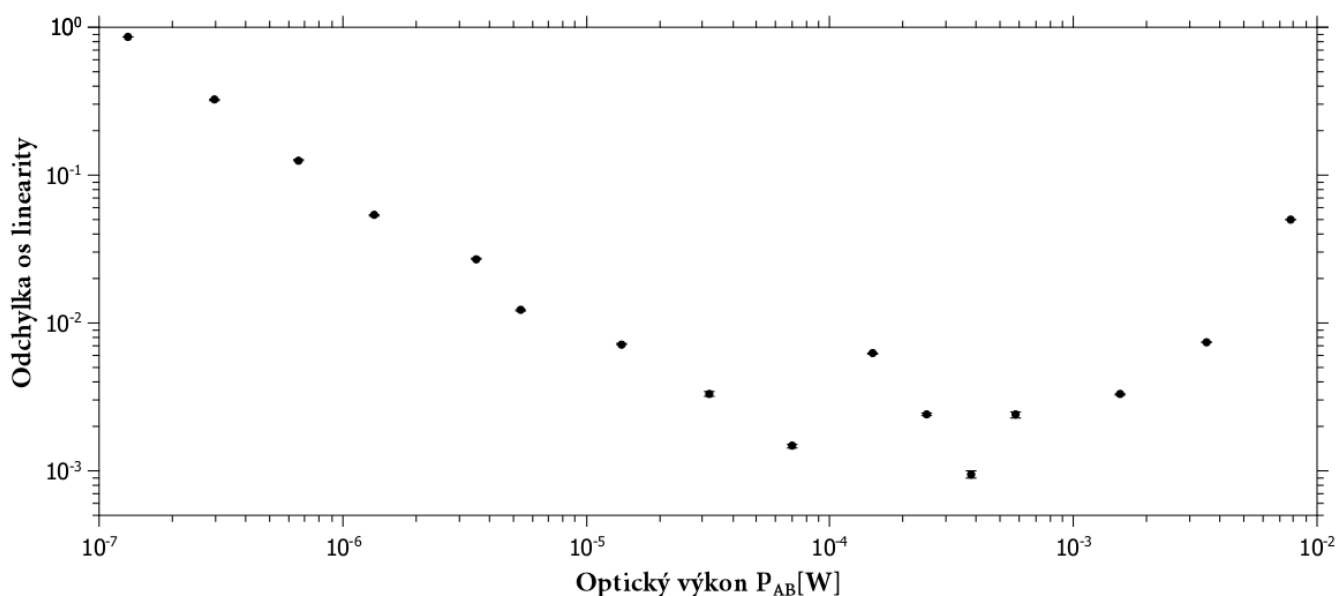


Obrázek 11: Závislost linearity na záporném předpětí měřená pro detektor DET36A od firmy Thorlabs. Jako zdroj napájení použit PL303-P od firmy TTI. Závislost vyhodnocena pro hodnoty záporného předpětí 12 V, 6 V, 3 V, 1,5 V a 0,7 V. Na výstupu vyčítán fotoproud multimetrem TTI 1906.

Na obrázku 11 je vynesena závislost linearity na velikosti záporného předpětí celkem pro pět různých hodnot napětí. Pro malé optické výkony nemá změna předpětí žádný vliv na lineární odezvu detektoru. Pokud se dostaneme u vyčítaných fotoproudů nad hodnotu  $10 \mu\text{A}$ , začnou se při zvyšování optického výkonu zvětšovat odchylky od linearity a to tím více, čím je hodnota záporného předpětí menší. Zvýšení předpětí v závěrném směru a pokles optické energie dopadajícího svazku vedou ke zlepšení linearity.

### 4.1.3 Vliv zesilovače na linearitu detektoru

Vliv zesilovače na linearitu jsem proměřil na detektoru PDA36A - EC (křemíková PIN fotodioda se zesilovačem) od firmy Thorlabs. Integrovaný zesilovač umožňuje zesílit výstupní signál v rozmezí 0 až 70 dB. Stejně jako u předchozího typu detektoru (DET36A) má i typ se zesilovačem aktivní plochu o velikosti 3,6 x 3,6 mm a rozsah vlnových délek 350 - 1100 nm. Proměřil jsem odchylky od linearity v celém výkonovém rozsahu pro všechny možnosti nastavitelného zesilovače. Z výsledných odchylek jsem vybral vždy tu nejmenší pro daný útlum. Vytvořil jsem tak nejlepší závislost linearity na zesilovači, kterou je detektor schopen změřit. Odchylky od linearity jsem vynesl v závislosti na optickém výkonu.



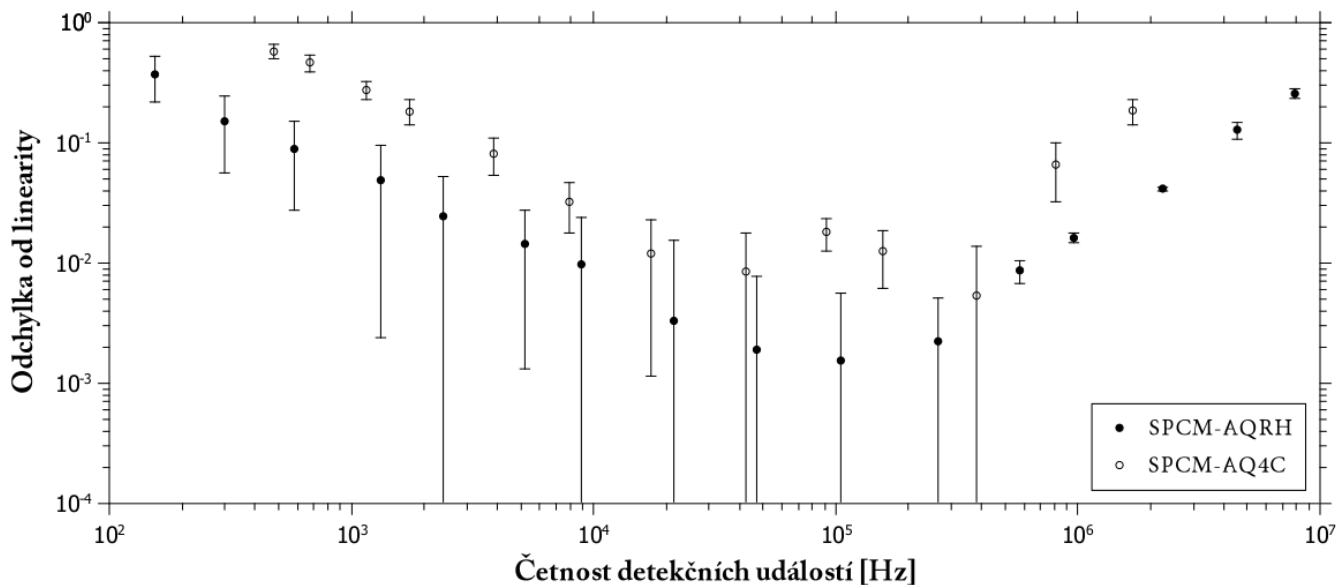
Obrázek 12: Vliv zesilovače na linearitu detektoru. Proměřený vzorek PDA36A - EC od firmy Thorlabs. Napětí na výstupu vyčítám multimetrem TTi 1906.

Z vybraných hodnot měření odchylek od linearity zobrazených na obrázku 12 je vidět znatelné zhoršení lineární odezvy detektoru s integrovaným zesilovačem v porovnání s předchozími výsledky klasického detektoru. Nejlepší odchylky od linearity dosahují hodnot pouhých  $10^{-3}$ . Na místo očekávaného zlepšení linearity v oblasti malých výkonů došlo ke zhoršení linearity detektoru v celém spektru výkonů. Možným vysvětlením změřené závislosti je nepřilíš kvalitní zesilovač, který svým šumem přispívá k nárůstu odchylek od linearity. Věřím, že při použití kvalitního externího zesilovače by detektor vykazoval zlepšení linearity pro malé optické výkony. Velmi malý detekovaný signál se na výstupu zesílí na hodnotu, kterou měřicí přístroj dokáže vyhodnotit s větší přesností. Zesilovač zvětší odstup signálu

z fotodetektoru od šumu měřícího zařízení a tím zmenší odchylku od linearity.

## 4.2 Jednofotonový detektor (APD v Geigerově módu)

Jednofotonové detektory běžně vykazují odchylky od linearity řádově  $10^{-2}$ . Pokud se-stavené měřící uspořádání umožňuje bez problému měřit odchylky s přesností  $10^{-5}$ , pak je vhodné i pro proměření linearity jednofotonových detektorů. Vzhledem k malým rozměrům aktivní plochy, řádově stovky mikrometrů, přivádím signál na detektor prostřednictvím optického vlákna. Svazek jsem za polarizační dělicí kostkou PBS2 navázal do vlákna pomocí optického zrcátka a kolimátoru (Schäfter-Kirchhoff 60FC-0-A11-02). Navázání do vlákna se povedlo provést s účinností 86%. Mezi detektor a kolimátor je umístěna spojka optických vláken s atenuačním šroubem, který slouží k regulaci počtu procházejících fotonů. Je to z důvodu ochrany fotodetektoru, kdy by velký počet detekovaných fotonů mohl způsobit silnou nárazovou ionizaci, jež by vedla k destrukci lavinové fotodiody fotodetektoru. K detektoru je připojen počítačem ovládaný čtyřkanálový čítač ORTEC 974A, který zaznamenává počet registrovaných detekcí za sekundu.



Obrázek 13: Linearita jednofotonových detektorů SPCM-AQRH (CD3432H) od firmy Excelitas a SPCM-AQ4C od firmy Perkin Elmer. Počet detekovaných událostí byl zaznamenáván pomocí čítače ORTEC 974A.

Jako první vzorek pro testování linearity jsem použil SPCM-AQRH (CD3432H) od firmy Excelitas. Tento detektor vyrobený z křemíkové lavinové fotodiody je schopen detekovat jednotlivé fotony v rozsahu vlnových délek 400 až 1060 nm. Výrobce garantuje účinnost detekce až 70% při vlnové délce 700 nm. Atenuačním šroubem jsem nastavil průchod fotonů tak, abych při maximálním optickém výkonu dosáhl pro detektor bezpečných 8 milionů detekcí za sekundu. Z toho detektor vykazoval temné county kolem 60 detekcí za sekundu. Pro srovnání dosažené linearity jsem proměřil i jednofotonový detektor SPCM-AQ4C od firmy Perkin Elmer. Jedná se o čtyřkanálový fotodetektor pracující ve stejném vlnovém spektru s účinností detekce 65% pro 600 nm. Detektor vykazoval temné county o velikosti 400 detekcí za sekundu. Počet detekovaných fotonů jsem upravil na 1,7 milionu za sekundu. Maximální přípustná hodnota udávaná výrobcem je 2 miliony detekcí za sekundu.

Výsledné odchylky od linearity obou proměřených vzorků jsou znázorněny na obrázku 13. Ze vzájemného porovnání vyšel lépe jednofotonový detektor SPCM-AQRH (CD3432H) od firmy Excelitas. Projevil se lepší lineární odezvou. V rozsahu 50000 až 500000 det/s vykazoval v nejlepším případě odchylky od linearity velikosti  $10^{-3}$  s neurčitostí stejného řádu. Naproti tomu druhý zkoumaný vzorek SPCM-AQ4C od firmy Perkin Elmer s menším rozsahem počtu detekcí za sekundu dosahuje odchylek od linearity  $10^{-2}$ . Bohužel se mi nepodařilo udržet neurčitosti příslušných odchylek na hodnotách  $10^{-5}$ , jako tomu bylo v předešlých měření. Předpokládám, že bližší analýza časové rezie a počtu opakování pro příslušný čítač by vedla ke zlepšení přesnosti měření.

## 5 Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo změřit a zdokumentovat závislost linearity detektoru na průměru dopadajícího svazku, velikosti záporného předpětí, vlivu zesilovače a dále nelinearity jednofotonových detektorů. Za účelem prozkoumání uvedených závislostí jsem navrhl vhodné měřicí uspořádání. Pro měření linearity detektoru jsem použil dvousvazkovou metodu. Při sestavování experimentu jsem řešil celkovou automatizaci měření. Navrhl jsem mechanické komponenty sloužící k útlumu optického výkonu a přepínání optických svazků. Tato zařízení umožnila rapidní snížení celkového času měření. Celý měřicí proces byl řízen pomocí počítače. Proměřil jsem odchylky od linearity pro optické výkony v rozsahu  $10^{-7}$  až  $10^{-2}$  W. Během zkušebních měření jsem narazil hned na několik problémů limitujících přesnost měření, jež se mi povedlo analyzovat a odstranit.

J.Fischer a L.Fu ve své práci dosáhli odchylky od linearity  $1 \cdot 10^{-4}$  [1]. S finálním měřicím uspořádáním se mi povedlo snížit odchylky od linearity na pouhých  $(3 \pm 2) \cdot 10^{-5}$ . K podobnému výsledku se dopracoval i E.Ikonen [11]. První jsem změřil závislost linearity detektoru na velikosti optického svazku. Odchylky od linearity jsou závislé na fokusaci pro optické výkony vyšší než 1 mW. V této oblasti výkonů detektor vykazuje lepší linearitu pro optické svazky s větším průměrem. Z výsledků mohu konstatovat, že linearita detektoru je závislá na plošné hustotě optického výkonu optického svazku. Výsledná závislost je v souladu s prací [2]. Dále jsem změřil závislost linearity detektoru na velikosti záporného předpětí. U vyčítaných fotoproudů nad hodnotu  $10 \mu\text{A}$  se začne projevovat závislost odchylek od linearity na záporném předpětí. Se vzrůstajícím napětím se zlepšuje i lineární odezva detektoru. Potvrdil jsem tak tvrzení publikované v práci [10]. Pro vyšší optické výkony je tak výhodné používat větší záporné předpětí. Poté jsem zkoumal vlivy zesilovače na linearitu detektoru. Použil jsem detektor s integrovaným zesilovačem. U zvoleného detektoru došlo k nárůstu odchylek od linearity až na hodnoty  $10^{-3}$ . Očekával jsem zlepšení lineární odezvy v oblasti malých výkonů, kde by se zesílením signálu na výstupu povedlo zvětšit odstup signálu od šumu měřicího zařízení a tím tak zlepšit přesnost měření.

Posledním cílem bylo proměřit nelinearitu jednofotonového detektoru. Jedná se pravděpodobně o první měření nelinearity jednofotonového detektoru pomocí dvousvazkové metody, tedy absolutně. K dispozici jsem měl dva jednofotonové detektory od různých výrobců, jejichž nelinearity jsem měl možnost porovnat. Odchylky od linearity dosahovaly řádově  $10^{-2}$ . S nejlepším měřením jsem se dostal až k hodnotám  $10^{-3}$  s řádově stejnými neurčitostmi. Předpokládám, že by se neurčitost měření dala ještě snížit. Zapotřebí by bylo důkladně analyzovat dobu měření a počet opakování, jejichž vhodná kombinace by vedla ke zlepšení.

## Reference

- [1] J. Fischer, L. Fu, *Photodiode nonlinearity measurement with an intensity stabilized laser as a radiation source*, Applied Optics Vol.**32**, No.**22** 4187(1993).
- [2] T. Kübarsepp, A. Haapalinna, P. KärhÄ , E. Ikonen, *Nonlinearity measurements of silicon photodetectors*, Applied Optics Vol.**37**, No.**13** 2716 (1998).
- [3] B. Saleh, M. Teich, Fundamentals of Photonics (John Wiley & Sons, 1991).
- [4] L. Bartůšková, M. Dušek, J. Fiurášek, Z. Hradil, M. Ježek, M. Mičuda, L. Slodička, *Vláknová optika na telekomunikačních vlnových délkách* (Přf.UP katedra optiky, 2008).
- [5] Charles Kittel, *Úvod do fyziky pevných látek* (Academia, 1985).
- [6] Special Issue on Single-photon: detectors, applications, and measurement methods, Journal of Modern Optics, **51**, 1265 (2004).
- [7] P. Malý, Optika (Karolinum, 2008).
- [8] D. Allan, Statistics of atomic frequency standards, Proceedings of IEEE 54, 221–230 (1966).
- [9] Dokumentace Laboratoře kvantové optiky a informatiky katedry optiky Přf UP (2012).
- [10] Y. Zhao, *Experimental investigation on nonlinearities of PIN photodiodes*, Microelectronics Journal **37**, 534 (2006).
- [11] A. Haapalinna, T. Kübarsepp, P. KärhÄ , E. Ikonen, *Measurement of the absolute linearity of photodetectors with a diode laser*, Meas. Sci. Technol. **10**, 1075 (1999).