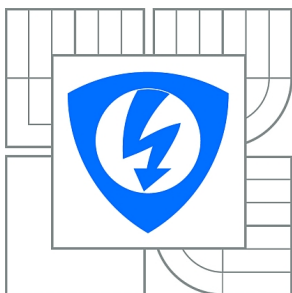




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

PRACOVISTĚ PRO TESTOVÁNÍ FOTODIOD

WORKPLACE FOR TESTING OF THE PHOTODIODES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDREJ ŠEDO

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. OTAKAR WILFERT, CSc.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Ondrej Šedo

ID: 125653

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Pracoviště pro testování fotodiod

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem funkce fotodiod (PIN a APD) a popište jejich základní charakteristiky a parametry. Navrhněte pracoviště pro testování standardních typů fotodiod a vytvořte program s grafickým výstupem umožňujícím stanovit zorný úhel a citlivost fotodiody.

Navržené pracoviště sestavte a experimentálně ověřte jeho možnosti a přesnost měření. Naměřené výsledky vybraných fotodiod porovnejte s jejich katalogovými údaji.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SALEH, B. E. A. Základy fotoniky. Praha: Matfyzpress, 1995.

[2] ALEXANDER, S. B. Optical Communication Receiver Design. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1997.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

Vedoucí práce: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Táto práca je zameraná na návrh a vytvorenie pracoviska vhodného na meranie základných parametrov a charakteristík bežných fotodiód. Súčasťou je experimentálne overenie jeho možností a porovnanie nameraných výsledkov s katalógovými hodnotami, ako aj vytvorenie programu na grafické spracovanie nameraných údajov.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

fotodióda, laser, fotodetekcia, PIN, APD

ABSTRACT

This paper is focused on design of the workplace for measuring basic parameters and characteristics of standard photodiodes. There is also experimental test of its possibilities and comparison of the measurement results with the catalogue data. It also includes elaboration of an algorithm that processes the measurement data into visual presentation.

KEYWORDS

photodiode, laser, photodetection, PIN, APD

ŠEDO, O. *Pracoviště pro testování fotodiod.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2013. 23 s., 2 s. příloh. Bakalářská práce. Vedúci práce: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Pracoviště pro testování fotodiod“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky uvedené v zozname literatúry na konci práce.

V Brne dňa

.....

(podpis autora)

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce prof. Ing. Otakarovi Wilfertovi, CSc. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovávaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa

.....

(podpis autora)

OBSAH

Zoznam obrázkov	VIII
Zoznam tabuliek	IX
Úvod	1
1 Fotodióda	2
1.1 Princíp fotodiódy	2
1.2 Schottkyho fotodióda	4
1.3 PIN fotodióda	5
1.4 Lavínová fotodióda	5
2 Vlastnosti fotodiód	8
2.1 Parametre fotodiód	8
2.1.1 Citlivosť	8
2.1.2 Šum	8
2.1.3 Zorný uhol	9
2.1.4 Časové parametre	9
2.2 Charakteristiky fotodiód	9
3 Návrh pracoviska	11
3.1 Optická časť	11
3.2 Mechanická časť	12
3.3 Elektronická časť	12
3.4 Program na spracovanie údajov do grafickej podoby	13
4 Testovanie vybratej fotodiódy	14
4.1 Meranie zorného uhla	14
4.2 Meranie citlivosti	17
4.3 Porovnanie nameraných výsledkov s katalógovými hodnotami	19
4.3.1 Zorný uhol	19
4.3.2 Citlivosť	19
Záver	20

Literatúra	21
Zoznam skratiek	22
Zoznam príloh	23

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1.1: Ochudobnená oblasť PN prechodu	2
Obrázok 1.2: V-A charakteristika fotodiódy	3
Obrázok 1.3: Štruktúra MSM fotodiódy	4
Obrázok 1.4: Štruktúra lavínovej fotodiódy	6
Obrázok 2.1: Zorný uhol fotodiódy	9
Obrázok 2.2: Spektrálna závislosť citlivosti kremíkovej fotodiódy	10
Obrázok 3.1: Bloková schéma optickej časti navrhovaného pracoviska.....	11
Obrázok 3.2: Obvodové zapojenie fotodiódy	12
Obrázok 3.3: Grafické rozhranie programu po spustení	13
Obrázok 3.4: Dialógové okno tlačidla Pridaj.....	13
Obrázok 4.1: Dvojsenzorová fotodióda DSD2	14
Obrázok 4.2: Meranie zorného uhla fotodiódy	15
Obrázok 4.3: Meranie zorného uhla pre vlnovú dĺžku 980nm (Si)	16
Obrázok 4.4: Meranie zorného uhla pre vlnovú dĺžku 1550nm (InGaAs)	16
Obrázok 4.5: Meranie citlivosti fotodiódy pri vlnovej dĺžke 670nm	17
Obrázok 4.6: Meranie citlivosti fotodiódy pri vlnovej dĺžke 980nm	18
Obrázok 4.7: Meranie citlivosti fotodiódy pri vlnovej dĺžke 1550nm	18
Obrázok 4.8: Katalógové údaje o citlivosti fotodiódy DSD2	19

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 4.1: Meranie zorného uhla fotodiódy	15
Tabuľka 4.2: Meranie citlivosti fotodiódy	17

ÚVOD

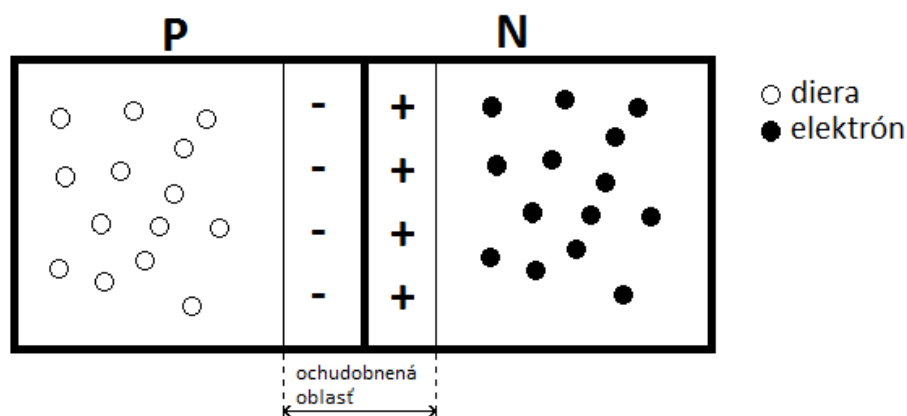
V dnešnej dobe stále sa zvyšujúcich nárokov na prenosové rýchlosti v informačných technológiách je používanie optickej komunikácie veľmi výhodné. A ako každý komunikačný kanál, aj optické kanály musia obsahovať prijímač, ktorého hlavnú zložku tvorí vo väčšine prípadov fotodióda. Táto práca je zameraná na návrh a realizáciu pracoviska určeného pre meranie základných parametrov a charakteristík vybraných fotodiód a vytvorenie programu, ktorého výstupom je grafické znázornenie nameraných údajov a charakteristík.

V prvej kapitole práce je popísaný princíp premeny vstupnej veličiny, optického výkonu, na výstupnú elektrickú veličinu (prúd, napätie) a takisto je tu popísaná štruktúra Schottkyho, PIN a lavínovej fotodiódy spolu s ich základnými vlastnosťami. V druhej kapitole sú uvedené parametre a charakteristiky, s ktorými sa pri fotodiódach stretávame. Tretia kapitola tejto práce obsahuje návrh pracoviska na meranie vybraných parametrov a charakteristík štandardných fotodiód. Záverečná kapitola sa už zaoberá vlastnými meraniami na navrhnutom pracovisku a vyhodnotením nameraných údajov pomocou vytvoreného programu, a takisto ich porovnaním s katalógovými hodnotami.

1 FOTODIÓDA

1.1 Princíp fotodiódy

Základná funkcia fotodiódy je založená na absorpcii fotónov v polovodičovom materiáli v oblasti PN prechodu. Je známe, že okamžite po vytvorení PN prechodu dochádza k difúzii nosičov náboja (dier a elektrónov) v snahe vyrovnať ich hustotu v polovodiči. Takto klesá počet dier v polovodiči typu P a analogicky aj počet elektrónov v polovodiči typu N. Týmto sa v blízkosti prechodu tvorí kladný náboj na strane polovodiča N a záporný na strane P. To zapríčini vznik bariéry, ktorá postupne zastaví difúzny tok nosičov a zároveň vznikne tzv. ochudobnená oblasť s veľmi malou koncentráciou nosičov náboja (obr. 1.1). Fotón, ktorý sa dostane do tejto oblasti PN prechodu spôsobí vznik páru elektrón-diera. Tieto sú pôsobením elektrického poľa oblasti transportované na jej okraj a vytvárajú tak prúd fotodiódou.



Obrázok 1.1: Ochudobnená oblasť PN prechodu

Pripojením fotodiódy na externé elektrické pole v závernom smere dosiahneme rozšírenie ochudobnenej oblasti, pričom platí, že čím silnejšie pole, tým väčšia šírka tejto oblasti. Tento efekt je obmedzený saturáciou nosičov náboja PN prechodu. Ak by sme zosilňovali pripojené elektrické pole aj po saturácii, môže dôjsť k poškodeniu polovodičového materiálu.

Na voltampérovej charakteristike fotodiódy vidno tri pracovné režimy (obr. 1.2). V I. kvadrante s narastajúcim optickým výkonom rastie napätie na fotodióde (fotovoltaiický režim). V IV. kvadrante pracuje fotodióda v hradlovom režime a v III. kvadrante v tzv. odporovom režime. Bez ohľadu na pracovný režim sú prúd a napätie na dióde kombináciou svetlom indukovaného prúdu a pripojeného jednosmerného napätia, alebo vychádzajú z V-A charakteristiky polovodičovej diódy. Túto kombináciu môžeme zapísať nasledujúcim vzťahom [1]:

$$i_d = i_s \left[\exp\left(\frac{qv_d}{kT}\right) - 1 \right] + i_{leakage} - i_f, \quad (1.1)$$

kde

i_s – záverný saturačný prúd,

$i_{leakage}$ – stratový prúd fotodiódou (tvorený generáciou a rekombináciou v ochudobnenej oblasti),

v_d – napätie na fotodióde,

i_d – prúd fotodiódou,

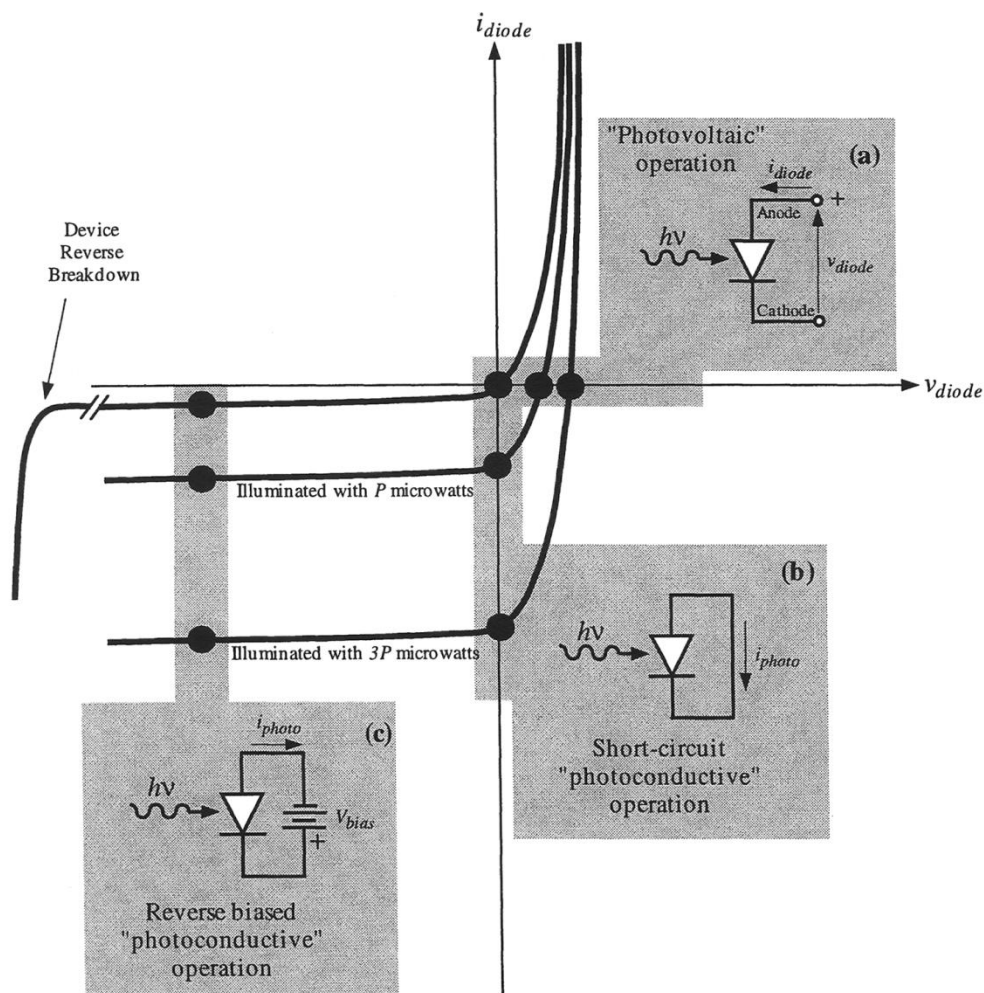
i_f – fotoprúd (svetlom generovaný prúd),

q – náboj elektrónu,

k – Boltzmannova konštanta,

T – teplota [K].

Prvé dva sčítance zo vzťahu (1.1) tvoria tzv. prúd za tmy, ktorý môže predstavovať značnú zložku pri vlnových dĺžkach v rádoch μm . Jeho zníženie sa dá zabezpečiť dobrým chladením. Avšak pri dĺžke vlny využívanéj v komunikačných aplikáciách ($<1550\text{nm}$) a izbovej teplote dosahuje maximálne desatiny nA.



Obrázok 1.2: V-A charakteristika fotodiódy (prebraté z [1])

Výslednú šírku pásma fotodiódy ovplyvňuje aj jej vnútorná kapacita a časová konštanta. Transportný čas nosičov náboja fotodiódy vypočítame ako dobu, za ktorú prejde diera/elektrón ochudobnenú oblasť. Preto platí [1]:

$$\tau_t = \frac{w}{v_s}, \quad (1.2)$$

kde

w – dĺžka ochudobnenej oblasti,

v_s – rýchlosť nosičov náboja v saturácii.

Kapacitu fotodiódy môžeme vypočítať podľa nasledujúceho vzťahu [2]:

$$C = \varepsilon \frac{S}{w}, \quad (1.3)$$

kde

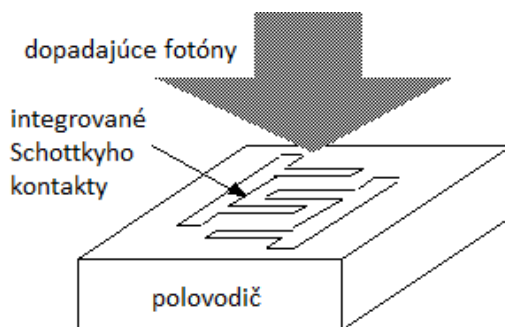
ε – permitivita prostredia (polovodiča),

S – plocha PN prechodu.

Kapacitu fotodiódy môžeme znížiť predĺžením ochudobnenej oblasti, čím zvýšime aj kvantovú účinnosť [1], ale zároveň zvýšime transportný čas nosičov. Dobre navrhnutá fotodióda však môže mať aj vysokú kvantovú účinnosť aj veľkú šírku pásma.

1.2 Schottkyho fotodióda

Ako už názov napovedá, jedná sa o fotodiódu s prechodom kov-polovodič. Na tomto rozhraní opäť vzniká ochudobnená oblasť. Kovová vrstva môže byť veľmi tenká, a preto ňou môže preniknúť žiarenie širokého spektra. Tento typ fotodiódy sa vyznačuje tiež veľmi rýchlym reakčným časom. Šírka pásma Schottkyho fotodiód môže presahovať stovky GHz [1]. Špeciálnym prípadom tohto typu fotodiódy je tzv. MSM fotodióda (kov-polovodič-kov). Jedná sa o planárne antisériové zapojenie dvoch Schottkyho diód (obr. 1.3).



Obrázok 1.3: Štruktúra MSM fotodiódy (prebraté z [3])

Absorbované fotóny generujú v polovodiči páry elektrón-diera, ktoré sú následne rozdelené vnútorným elektrickým poľom. Kvantová účinnosť MSM fotodiódy je závislá od tienenia spôsobeného kovovými elektródami. Vypočítame ju nasledujúcim vzťahom [1]:

$$\eta = (1 - R) \frac{s}{s+w} (1 - e^{-\alpha l_a}),$$

kde

l_a – dĺžka absorpčnej oblasti fotodiódy,
 R – reflektivita (odrazivosť) polovodičového materiálu,
 α – absorpčný koeficient polovodičového materiálu,
 w – šírka integrovaného výbežku elektródy,
 s – vzdialenosť medzi dvoma výbežkami elektródy.

Vnútorná kapacita takýchto fotodiód dosahuje hodnoty 0,1pF a menej. Bežne dosiahnuteľná šírka pásma sa pohybuje v desiatkach GHz. Po pripojení fotodiódy na vonkajšie napätie (5 – 10V) je jej V-A charakteristika rovnobežná s napäťovou osou a prúd v obvode je funkciou prijatého optického výkonu.

1.3 PIN fotodióda

Ďalším variantom PN fotodiódy je fotodióda PIN. Medzi vrstvy polovodičov typu P a N je vložená vrstva slabo dotovaného polovodiča I (intrinická). Ochudobnená oblasť tohto typu fotodiódy je takmer celá obsiahnutá v prostrednej vrstve a je značne dlhšia ako u PN fotodiódy. Toto predĺženie spôsobuje zvýšenie kvantovej účinnosti a tiež zníženie vnútornej kapacity fotodetektoru. Výhoda PIN fotodiódy spočíva aj v tom, že sila elektrického poľa v intrinickej vrstve je takmer konštantná, čo zapríčiňuje, že nosiče náboja sa pohybujú k okrajom ochudobnenej oblasti rýchlosťou rovnou alebo blízkou saturačnej rýchlosti. V podstate to znamená, že transportný čas nosičov náboja je aj napriek dlhšej ochudobnenej oblasti kratší.

Šírka pásma PIN fotodiódy je limitovaná dvoma faktormi. Transportným časom nosičov a RC časovou konštantou (sériový odpor a vnútorná kapacita fotodiódy). Približnú šírku pásma môžeme vypočítať nasledujúcim vzťahom [1]:

$$B = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{f_{RC}}\right)^2 + \left(\frac{1}{f_t}\right)^2}},$$

kde

f_{RC} – medzná frekvencia článku z časovou konštantou RC,

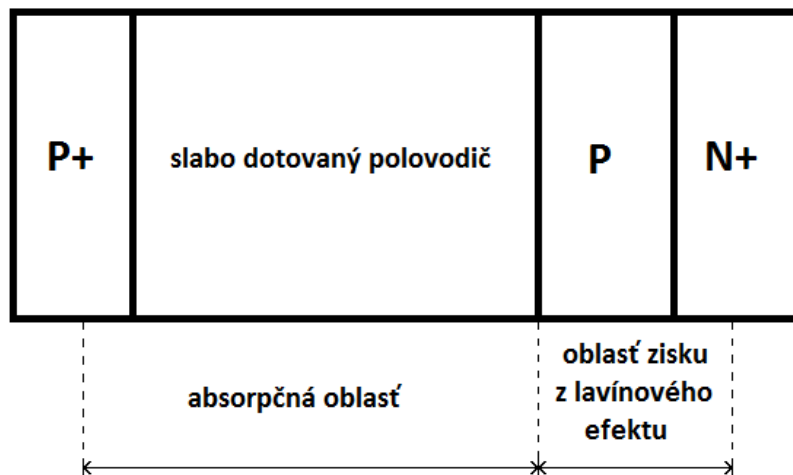
f_t – medzná frekvencia určená transportným časom nosičov.

Zjednodušený model predpokladá veľmi tenkú (opticky transparentnú) vrstvu P a N. To by znamenalo, že všetky fotóny sú absorbované v intrinickej vrstve. Niekedy sa na zvýšenie kvantovej účinnosti používa vysoko odrazová N vrstva, aby neabsorbované fotóny prechádzali absorpčnou oblasťou dvakrát.

1.4 Lavínová fotodióda

Lavínová fotodióda (APD) je schopná na rozdiel od štandardných PN a PIN fotodiód generovať absorpciou jedného fotónu viac párov elektrón-diera. Využívaný je tu lavínový prieraz PN prechodu. Nosiče náboja sú urýchľované silným priloženým elektrickým napätím (až 100V [2]), spôsobujú ionizáciu, ktorá generuje ďalšie páry

nosičov náboja. Príklad APD je na obrázku 1.4. Fotóny sú podobne ako vo fotodióde PIN absorbované v slabo dotovanom polovodiči. Generované nosiče sú následne transportované na okraj ochudobnenej oblasti, kde na ne začne pôsobiť vonkajšie silné elektrické pole. Tým sú ešte viac urýchlené, až svojou kinetickou energiou dokážu vypudiť ďalšie elektróny z valenčnej vrstvy, čím vznikajú nové páry elektrón-diera.



Obrázok 1.4: Štruktúra lavínovej fotodiódy

Na obrázku 1.4 vidíme oddelenú absorpčnú oblasť od ziskovej. Hovoríme o tzv. SAM (separate absorption and multiplication) APD [1]. Na maximalizovanie kvantovej účinnosti by mala byť absorpčná oblasť relatívne dlhá. Na druhej strane, aby sme predišli nekontrolovaným lavínovým prierazom, potrebujeme oblasť zisku relatívne krátku. Oddelenie týchto oblastí je zabezpečené rôznou dotáciou polovodičového materiálu vo fotodióde.

Zosilnenie z lavínového efektu sa vypočíta nasledovne [1]:

$$G = \frac{i_{FD}}{i_{primary}},$$

kde

i_{FD} – prúd fotodiódou,

$i_{primary}$ – vnútorný prúd APD pred zosilnením, pričom

$$i_{primary} = \frac{\eta q}{h\nu} P_{opt}.$$

V praxi sa toto zosilnenie pohybuje v rádoch desiatok až stoviek.

Šírka pásma APD je okrem RC časovej konštanty a transportného času nosičov náboja obmedzená aj časom potrebným na nábeh lavínového efektu. Ten môžeme pre fotodiódu, v ktorej sú elektróny hlavným zdrojom zosilnenia, približne vypočítať takto [4]:

$$\tau_g \cong \frac{Gkl_g}{v_e},$$

kde

k – ionizačný pomer dier a elektrónov

l_g – dĺžka oblasti zisku

v_e – driftová rýchlosť elektrónu

Typické hodnoty šírky pásma lavínových fotodiód sú od 100 do 200GHz.

2 VLASTNOSTI FOTODIÓD

2.1 Parametre fotodiód

Parameter slúži ako kritérium kvality určitej vlastnosti pri činnosti za určených podmienok. Je možné ho odmerať alebo vypočítať z nameraných a stanovených veličín.

2.1.1 Citlivosť

Asi najzákladnejším parametrom fotodiódy je miera jej schopnosti premeniť optický výkon na napätie alebo prúd. Podľa požadovaného výstupu rozlišujeme napäťovú/prúdovú citlivosť. Keďže fotodióda sa väčšinou správa ako zdroj prúdu, častejšie sa uvádza práve prúdová citlivosť,

$$S_I = \frac{dI}{dP_{opt}} [A.W^{-1}]. \quad (2.1)$$

Analogicky napäťovú citlivosť vypočítame vzťahom:

$$S_U = \frac{dU}{dP_{opt}} [V.W^{-1}]. \quad (2.2)$$

Citlivosť fotodiódy je spektrálne závislá. Napr. kremíkové PIN fotodiódy dosahujú maximálnu prúdovú citlivosť $0,6 A.W^{-1}$ pri dĺžke vlny 900nm [2].

2.1.2 Šum

Základné zdroje šumu fotodiód predstavuje tepelný a výstrelový šum a pri APD je to aj lavínový šum [5]. Každopádne v praxi sa uvádza väčšinou len jeden šumový parameter a to NEP (Noise Equivalent Power) – ekvivalentný šumový výkon. V podstate určuje minimálnu detekovateľnú strednú hodnotu harmonicky modulovaného optického výkonu. Definujeme ho ako hodnotu dopadajúceho optického výkonu, pri ktorom je výstupný pomer signál šum rovný jednej. Dá sa vyjadriť zápisom

$$NEP = \frac{\sqrt{\langle u_N^2 \rangle}}{S_U} = \frac{\sqrt{\langle i_N^2 \rangle}}{S_I} [W], \quad (2.3)$$

kde

u_N – šumové napätie,

i_N – šumový prúd.

Prevrátená hodnota NEP sa nazýva detektivita. Keďže aktívna plocha a šírka pásma fotodiódy sa v závislosti na aplikácií môžu meniť, je vhodnejšie definovať mernú detektivitu [5]:

$$D^* = D\sqrt{A \cdot B} = \frac{\sqrt{A \cdot B}}{NEP} [mHz^{1/2}W^{-1}], \quad (2.4)$$

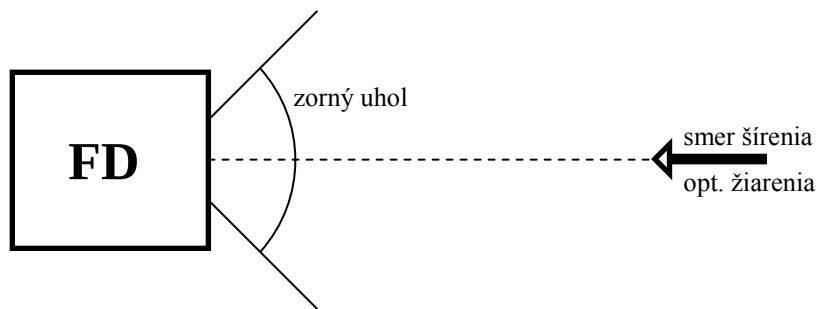
kde

A – aktívna plocha fotodiódy,

B – šírka pásma fotodiódy.

2.1.3 Zorný uhol

Takmer vo všetkých aplikáciách sa pri fotodióde predpokladá kolmý dopad optického žiarenia na absorpčnú plochu. V ostatných prípadoch treba pri výbere fotodiódy brať do úvahy aj jej zorný uhol, ktorý má vplyv na žiarenie pozadia. Zorný uhol vyjadruje uhol, v ktorom keď dopadá optické žiarenie na fotodiódu, neklesne výstupný elektrický prúd o viac ako polovicu maxima, ktoré dosahuje pri kolmom dopade toho istého optického žiarenia. Os zorného uhla je totožná s dráhou optického žiarenia pri kolmom dopade (obr. 2.1).



Obrázok 2.1: Zorný uhol fotodiódy (okraje znázorneného uhlu odpovedajú poklesu prijímaného optického výkonu oproti kolmému dopadu na polovicu)

2.1.4 Časové parametre

Príjem optického výkonu a jeho premena na elektrický signál predstavujú určité časové oneskorenie. Medzi zdroje tohto oneskorenia patria najmä nasledujúce:

- Doba života nosičov náboja – predstavuje strednú dobu života fotogenerovaných nosičov.
- Transportný čas nosičov – čas, ktorý potrebujú nosiče náboja na prechod polovodičovým materiálom.
- RC časová konštanta – vyplývajúca z vnútornej kapacity PN prechodu fotodiódy a z jej sériového odporu.
- Doba nábehu lavínového efektu – týka sa len lavínových fotodiód.

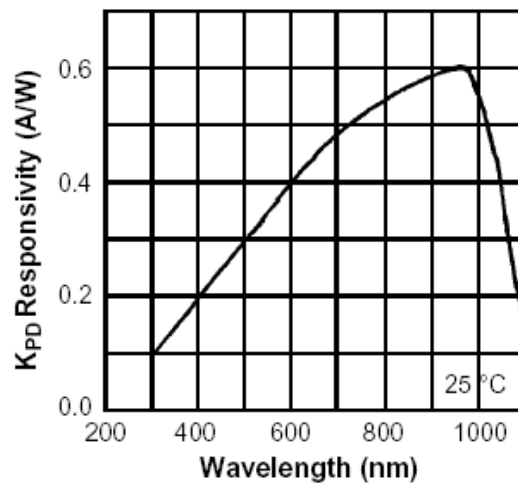
Tieto časové parametre ovplyvňujú hlavne výslednú šírku pásma danej fotodiódy.

2.2 Charakteristiky fotodiód

Charakteristika opisuje zmenu vybraného parametra vzhľadom na zmeny vonkajších veličín. Vyjadruje sa vzťahom, tabuľkou alebo grafom závislosti. Typickým príkladom pre fotodiódy môže byť V-A charakteristika (obr. 1.2). Vyjadruje závislosť prúdu fotodiódou na napätí. Často krát sa uvádza viac kriviek do jedného grafu, ktoré znázorňujú závislosť na prijímanom optickom výkone. Okrem napäťových/prúdových charakteristík je pre fotodiódy veľmi dôležitá aj spektrálna charakteristika (obr. 2.2). Najčastejšie sa uvádza závislosť citlivosti na vlnovej dĺžke optického signálu. Okrem spektrálnej závislosti, sa citlivosť fotodiódy môže meniť aj s veľkosťou prijímaného

optického výkonu. Tento faktor spôsobuje nelinearitu závislosti generovaného fotoprúdu na P_{opt} .

Okrem spomínaných existujú aj závislosti šumu (NEP) na priloženom napätí, alebo frekvencií a tiež fázové charakteristiky [5].



Obrázok 2.2: Spektrálna závislosť citlivosti kremíkovej fotodiódy (prebraté z [5])

3 NÁVRH PRACOVISKA

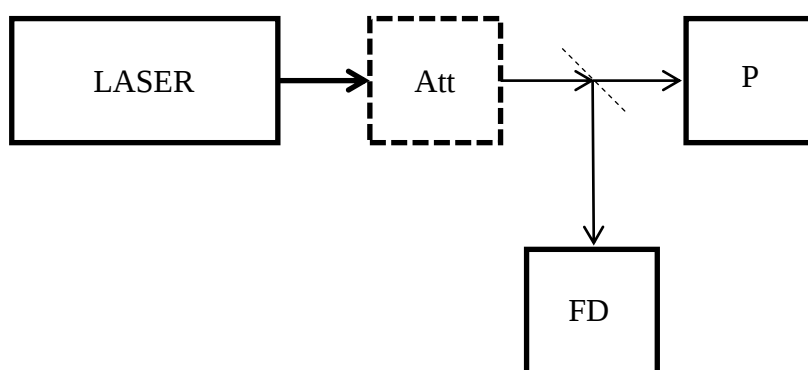
Samotné pracovisko pozostáva z troch základných častí, optickej, mechanickej a elektronickej. Optická a mechanická časť zahŕňa nastavovanie a meranie vlastností optického signálu a tiež jeho prenos ku fotodióde. Elektronická časť zabezpečuje meranie výstupného prúdu fotodiódou a prípadné napájanie. Rozhranie optickej a elektrickej časti tvorí práve fotodióda.

3.1 Optická časť

Základom optickej časti pracoviska je laser generujúci požadované optické žiarenie. Vzhľadom k potrebe meniť vlnovú dĺžku žiarenia pri meraní spektrálnych charakteristík je vhodné použiť preladiteľný laser. V praxi je možné ho nahradiť viacerými lasermi o rôznych vlnových dĺžkach. Pokiaľ nie je možné regulovať optický výkon laseru priamo elektronicke, je za laserom zaradený atenuátor, ktorým znižujeme hodnotu optického výkonu na požadovanú úroveň. Presnú hodnotu vyžarovaného výkonu môžeme sledovať meračom optického výkonu kalibrovaným na danú vlnovú dĺžku. Aby bol fotodiódou absorbovaný celý vyžarovaný optický výkon, musí byť obsah stopy žiarenia v rovine fotodiódy menší ako je obsah jej absorpčnej plochy. Nie je však dobré ožarovať fotodiódu bodovo. To docielime pomocou nastavenia vysielacej šošovky laseru. Vhodnejšia metóda je použiť široký optický zväzok a určiť intenzitu optického žiarenia v rovine fotodiódy. Z nej dokážeme pomocou veľkosti absorpčnej plochy určiť hodnotu absorbovaného optického výkonu pomocou nasledujúceho vzťahu:

$$P_{opt} = I_{opt} S_f, \quad (3.1)$$

kde I_{opt} je intenzita optického žiarenia v rovine fotodiódy a S_f je veľkosť jej absorpčnej plochy.



Obrázok 3.1: Bloková schéma optickej časti navrhovaného pracoviska

Na uvedenej blokovej schéme (obr. 3.1) šípky naznačujú smer šírenia laserového

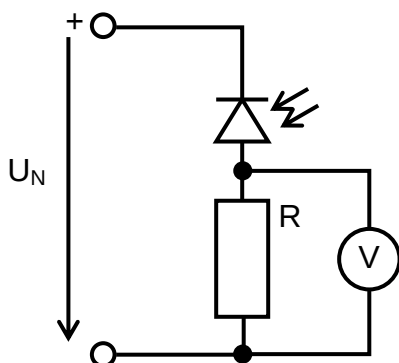
žiarenia a jednotlivé bloky sú: Att – atenuátor (ak je potrebný), P – merač optického výkonu, FD – fotodióda. Čiarkovaná čiara predstavuje polopriepustné zrkadlo (ideálne s koeficientom priepustnosti $\alpha = 0,5$). To však môže byť nahradené metódou merania, kedy budeme zamieňať merač optického výkonu za fotodiódu so zachovaním rovnakej vzdialenosti od laseru.

3.2 Mechanická časť

Pod mechanickou časťou navrhovaného pracoviska rozumieme upevnenie jednotlivých optických prvkov na stojany a tiež nastavovanie ich výšky a prípadné otáčanie daného optického prvku. Hlavne pri ožarovaní meranej fotodiódy je vyžadované čo najpresnejšie stotožnenie kolmej osi aktívnej plochy fotodiódy s vyžarovaným optickým žiarením.

3.3 Elektronická časť

Elektronickú časť tvorí jednoduché obvodové zapojenie (obr. 3.2). Ku fotodióde je sériovo pripojený odpor, pričom meranou veličinou je napätie na tomto odpore. Prúd odporom, a teda aj fotodiódou sa následne vypočíta podľa Ohmovho zákona. Napájacie napätie (U_N na obr. 3.2) je rôzne v závislosti na použitej fotodióde. Pre PIN fotodiódu stačí 5 až 10V, ale pre APD až 100V. Požadovaná je vysoká stabilita napätia, aby nebolo ovplyvnené meranie. To môže byť ovplyvnené aj zmenou teploty prostredia resp. fotodiódy. V takomto prípade je vhodné využiť Peltierov článok na udržanie stabilnej teploty fotodiódy počas merania.

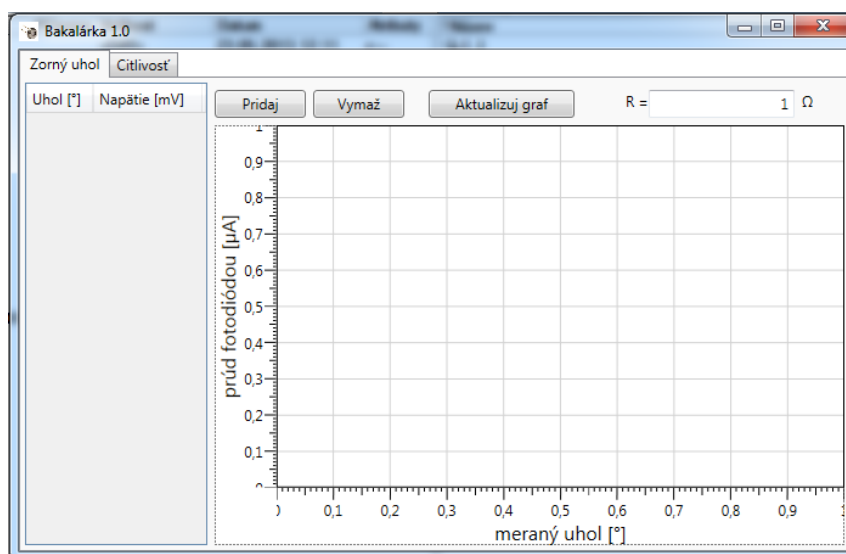


Obrázok 3.2: Obvodové zapojenie fotodiódy

Pokiaľ testujeme fotodiódu v pracovnom režime bez externého napájania, môžeme ju pripojiť priamo na vstup osciloskopu. V takomto prípade vypočítame prúd fotodiódou pomocou Ohmovho zákona z nameraného napätia a vstupného odporu osciloskopu.

3.4 Program na spracovanie údajov do grafickej podoby

Vytvorený program umožňuje po spracovaní nameraných údajov do grafickej podoby stanoviť zorný uhol a citlivosť fotodiódy. Pre tvorbu programu som si vybral programovací jazyk C#, pomocou ktorého som vytvoril jednoduché a intuitívne grafické rozhranie (obr. 3.3). To obsahuje dve karty. Jednu pre meranie zorného uhla a druhú pre citlivosť fotodiódy. Pomocou tlačidla Pridaj sa otvorí dialógové okno na zadávanie nameraných údajov (obr. 3.4). Tie po zadaní potvrdíme tlačidlom OK. Takto postupne pridáme v príslušnej karte všetky namerané údaje. Do textového poľa označeného „R=“ zadáme hodnotu odporu, na ktorom boli merania uskutočnené. Následne tlačidlom Aktualizuj graf program znázorní grafickú podobu nameraných údajov.



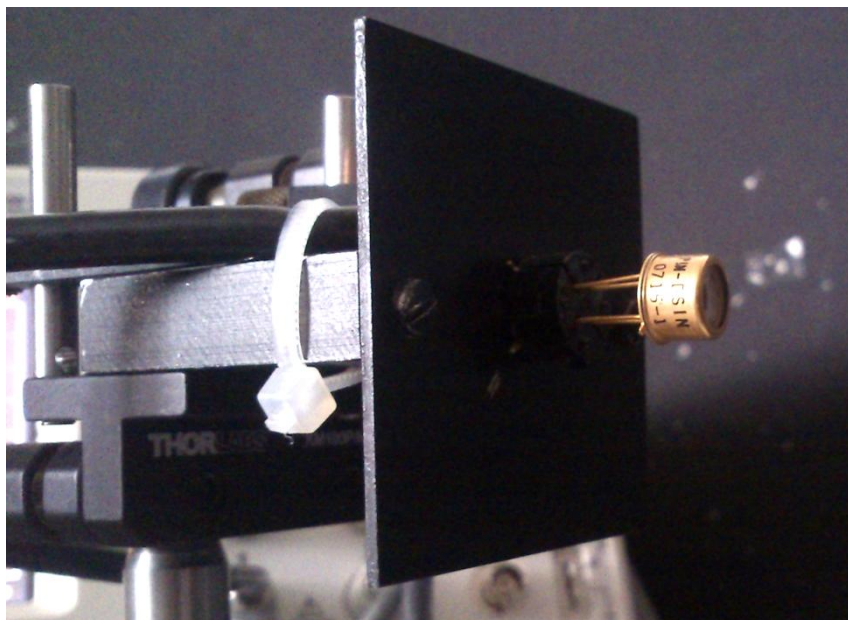
Obrázok 3.3: Grafické rozhranie programu po spustení

Obrázok 3.4: Dialógové okno tlačidla Pridaj

Program rozpoznáva kladné aj záporné, celé aj desatinné čísla. Samozrejmosťou je ošetrovanie vstupov (napr. pri zadaní textu namiesto čísla). Výsledný znázornený graf je možné pomocou myši posúvať, priblížiť, oddialiť a cez kontextové menu aj uložiť vo forme obrázka. Vykresľovanie grafu je vykonávané prostredníctvom voľne dostupnej knižnice DynamicDataDisplay.dll. Hlavné funkcie a triedy v jazyku C# sú uvedené v prílohe práce. Kompletné zdrojové kódy programu sú na priloženom CD.

4 TESTOVANIE VYBRATEJ FOTODIÓDY

Na testovanie bola určená dvojsenzorová fotodióda DSD2 od firmy Thorlabs. Detekciu optického žiarenia zabezpečujú dva nezávislé fotosenzory. Jedná sa o Si substrát, pre vlnové dĺžky od 400nm do 1100nm, umiestnený na InGaAs substráte, ktorý detekuje vlnové dĺžky od 940nm do 1700nm. Výrobcom udávané priemery aktívnych plôch senzorov sú 2,54mm pre Si a 1,5mm pre InGaAs. Fotodióda je umiestnená v puzdre TO-5 so štyrmi pinmi, dva pre každý senzor. Výrobca udáva reakčnú dobu pre obe vrstvy 4 μ s [6]. Preto nie je vhodné na meranie použiť dostupný preladiateľný laser, ktorý pracuje v impulznom režime s dĺžkou impulzov v rádoch ns. Pri meraniach bola fotodióda pevne pripevnená k stojanu (obr. 4.1) a pripojená priamo k dvojkanálovému osciloskopu typu Agilent DSO3202A so vstupným odporom 1M Ω . Výstup z každého fotosenzoru fotodiódy bol pripojený na iný kanál a na osciloskope zapnuté meranie napätia (V_{avg}).



Obrázok 4.1: Dvojsenzorová fotodióda DSD2

4.1 Meranie zorného uhla

Zorný uhol fotodiódy som meral postupným zvyšovaním uhla dopadu optického žiarenia na aktívnu plochu fotodiódy voči optickej osi fotodiódy. K presnému nastaveniu tohto uhla som použil vytvorenú šablónu so stupňovaním po 5° (obr. 4.2). Keďže sa jedná o dvojsenzorovú fotodiódu, bolo potrebné odmerať zorný uhol pre obe aktívne plochy. Merania boli uskutočnené na vlnových dĺžkach 980nm pre Si senzor a 1550nm pre InGaAs senzor.

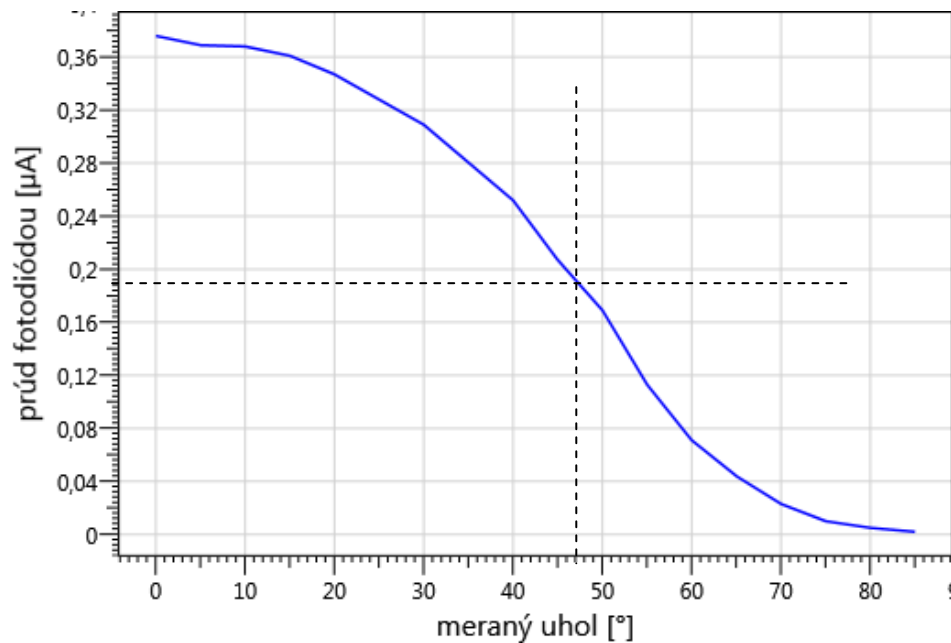


Obrázok 4.2: Meranie zorného uhla fotodiódy

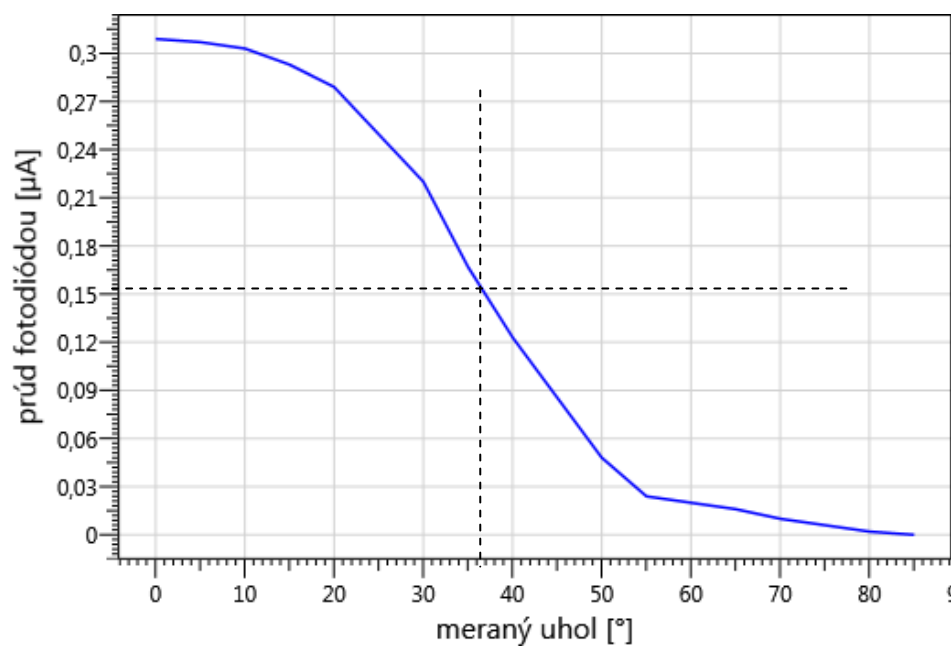
Pre symetrickosť fotodiódy som meral len pri uhle dopadu od 0° do 85° . Výsledný zorný uhol stanovím ako dvojnásobok uhlu dopadu, pri ktorom došlo k 50% poklesu generovaného fotoprúdu oproti kolmému dopadu optického žiarenia. Namerané údaje sú spracované v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 4.1: Meranie zorného uhla fotodiódy

$\lambda=980\text{nm}$			$\lambda=1550\text{nm}$		
uhol dopadu $[\circ]$	napätie [mV]	$I_{\text{FD}} [\mu\text{A}]$	uhol dopadu $[\circ]$	napätie [mV]	$I_{\text{FD}} [\mu\text{A}]$
0	376	0,376	0	309	0,309
5	369	0,369	5	307	0,307
10	368	0,368	10	303	0,303
15	361	0,361	15	293	0,293
20	347	0,347	20	279	0,279
25	328	0,328	25	249	0,249
30	309	0,309	30	220	0,220
35	281	0,281	35	167	0,167
40	252	0,252	40	123	0,123
45	207	0,207	45	86	0,086
50	169	0,169	50	48	0,048
55	113	0,113	55	24	0,024
60	71	0,071	60	20	0,020
65	44	0,044	65	16	0,016
70	23	0,023	70	10	0,010
75	10	0,010	75	6	0,006
80	5	0,005	80	2	0,002
85	2	0,002	85	0	0,000



Obrázok 4.3: Meranie zorného uhla pre vlnovú dĺžku 980nm (Si)



Obrázok 4.4: Meranie zorného uhla pre vlnovú dĺžku 1550nm (InGaAs)

Na obrázkoch 4.3 a 4.4 je výstup z vytvoreného programu doplnený o čiarkované čiary znázorňujúce pokles prúdu fotodiódou o 50%. Z grafov závislostí som stanovil zorné uhly:

- Pre Si fotosenzor je zorný uhol $2 \cdot 47^\circ = 94^\circ$.
- Pre InGaAs fotosenzor je zorný uhol $2 \cdot 36,5^\circ = 73^\circ$.

Významným poznatkom pri meraní zorného uhla bolo overenie štruktúry usporiadania aktívnych plôch fotodiódy. Jedná sa o „sendvičové“ usporiadanie, kedy sú jednotlivé aktívne plochy uložené na sebe. Pri takomto usporiadaní prepúšťa vrchná

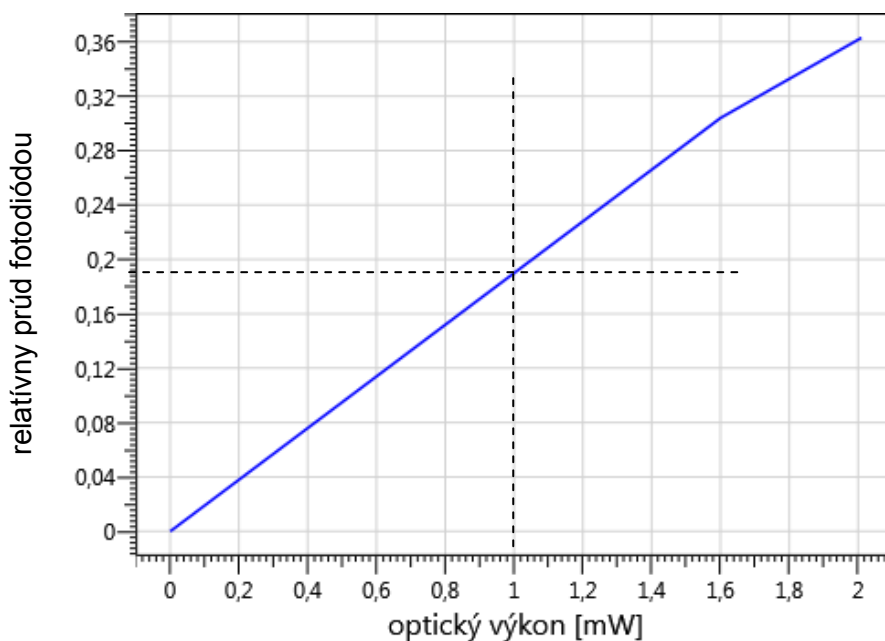
aktívna plocha optické žiarenie v rozsahu vlnových dĺžok, ktoré absorbuje aktívna plocha spodného senzoru.

4.2 Meranie citlivosti

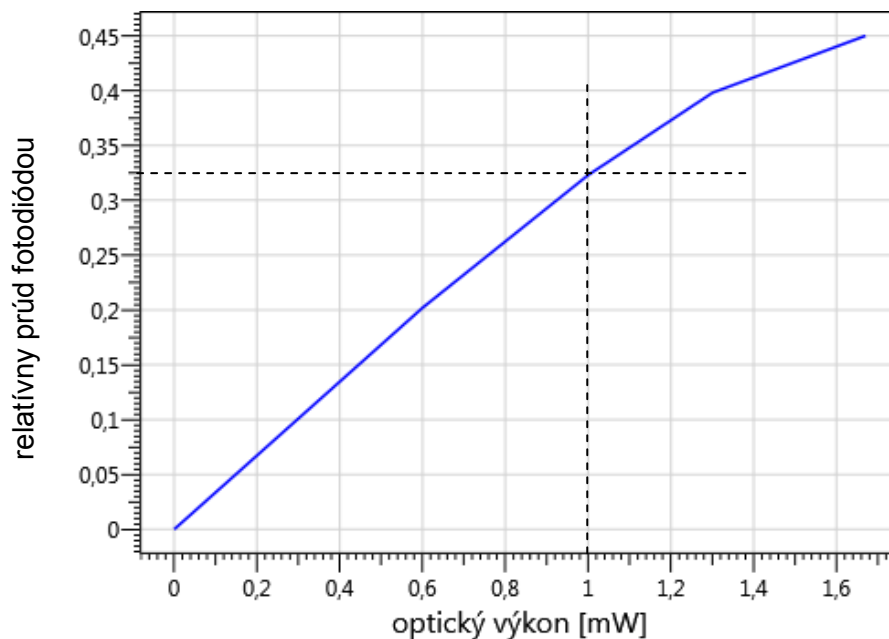
Pri meraní citlivosti fotodiódy bola stopa optického žiarenia v rovine fotodiódy menšia ako aktívna plocha meraného fotosenzoru. Na meranie optického výkonu som použil merač Vega – Laser power meter. Pomocou tohto merača a nastavenia výkonu na laseri som nastavoval optický výkon a následne z osciloskopu odčítal namerané napätie. Laserové žiarenie nebolo pri meraní modulované a na osciloskope som meral jednosmernú zložku napätia. Merania boli uskutočnené na troch rôznych vlnových dĺžkach. Pre Si fotosenzor to bolo 670nm a 980nm a pre InGaAs na vlnovej dĺžke 1550nm. Namerané hodnoty sú spracované v nasledujúcej tabuľke.

Tabuľka 4.2: Meranie citlivosti fotodiódy

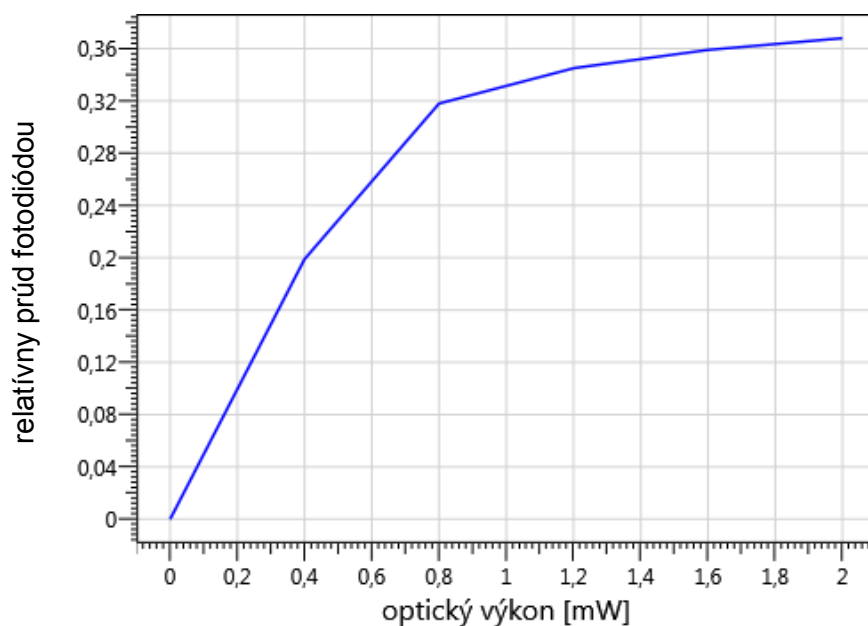
$\lambda=670\text{nm}$			$\lambda=980\text{nm}$			$\lambda=1550\text{nm}$		
P_{opt} [mW]	napätie [mV]	relatívny I_{FD}	P_{opt} [mW]	napätie [mV]	relatívny I_{FD}	P_{opt} [mW]	napätie [mV]	relatívny I_{FD}
2,01	363	0,363	1,67	450	0,450	2	368	0,368
1,6	304	0,304	1,3	398	0,398	1,6	359	0,359
1,2	232	0,232	1,0	323	0,323	1,2	345	0,345
0,8	158	0,158	0,6	202	0,202	0,8	318	0,318
0,4	80	0,080	0,3	99	0,099	0,4	199	0,199
0	0	0	0	0	0	0	0	0



Obrázok 4.5: Meranie citlivosti fotodiódy pri vlnovej dĺžke 670nm



Obrázok 4.6: Meranie citlivosti fotodiódy pri vlnovej dĺžke 980nm



Obrázok 4.7: Meranie citlivosti fotodiódy pri vlnovej dĺžke 1550nm

Pri meraní citlivosti fotodiódy som sa zameral na overenie jej lineárnosti, pretože pri praktickom využití je to veľmi dôležitý faktor. Zo závislostí na obrázkoch 4.5 a 4.6 vidieť lineárny priebeh fotoprúdu vzhľadom na prijatý optický výkon. Z toho plynie, že citlivosť fotosenzora Si ostáva s meniacim sa optickým výkonom nemenná. Pri vlnovej dĺžke 1550nm (InGaAs) som nameral nelineárnu závislosť fotoprúdu na prijímanom optickom výkone (obr. 4.7). Citlivosť fotodiódy v tomto prípade s rastúcim optickým výkonom postupne klesala.

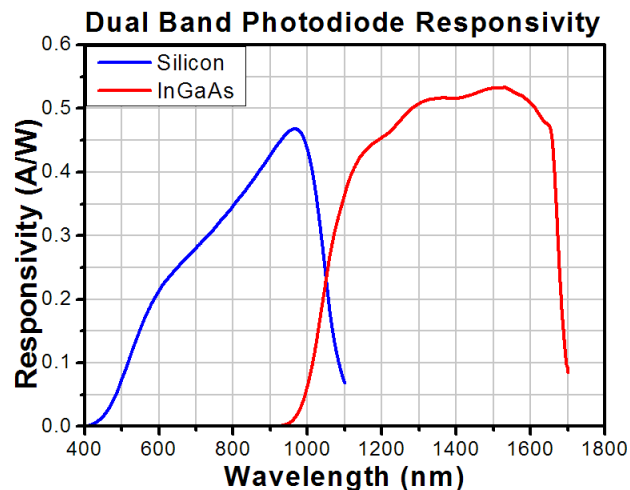
4.3 Porovnanie nameraných výsledkov s katalógovými hodnotami

4.3.1 Zorný uhol

Stanovený zorný uhol fotodiódy nie je možné porovnať s katalógovou hodnotou, pretože výrobca tento údaj neuvádza. Z tohto dôvodu je možné považovať meranie zorného uhla danej dvojsenzorovej fotodiódy za pôvodné. Zistené „sendvičové“ usporiadanie senzorov sa zhoduje s usporiadaním, ktoré uvádza výrobca.

4.3.2 Citlivosť

Výrobca udáva citlivosť fotodiódy ako graf závislosti od vlnovej dĺžky optického žiarenia (obr. 4.8).



Obrázok 4.8: Katalógové údaje o citlivosti fotodiódy DSD2 (prebraté z [6])

Pre merané vlnové dĺžky je možno vyčítať citlivosti približne:

- 0,26A/W pri 670nm
- 0,46A/W pri 980nm
- 0,52A/W pri 1550nm

Pri meraniach na Si senzore som potvrdil lineárnosť závislosti fotoprúdu na prijímanom optickom výkone. Naopak pri fotosenzore InGaAs som nameral pokles prúdovej citlivosti s rastúcim prijímaným optickým výkonom. Z toho vyplýva, že prúdovú citlivosť na vlnovej dĺžke 1550nm 0,52A/W, bude fotodióda dosahovať len pri prijímanom optickom výkone približne do 0,5mW. Táto nelineárnosť je pri väčšine aplikáciách v praxi nežiadúca.

ZÁVER

V tejto bakalárskej práci som popísal princíp a základné vlastnosti vybraných fotodiód a navrhol som pracovisko na ich meranie. Návrh obsahuje optickú, mechanickú a elektronickú časť a tiež vytvorenie programu na grafické spracovanie nameraných údajov. Optická časť pracoviska pozostáva zo zariadení potrebných na generáciu a meranie optického žiarenia a jeho vlastností. Mechanická časť zabezpečuje upevnenie optických prvkov na pracovisku a tiež centrovanie laserového optického žiarenia v optickej osi fotodiódy. Elektrická časť zabezpečuje hlavne meranie prúdu fotodiódou. Vytvorený program umožňuje graficky spracovávať namerané údaje pre zorný uhol a citlivosť jednotlivých senzorov fotodiódy.

Navrhnuté pracovisko som použil na testovanie vybratej dvojsenzorovej fotodiódy DSD2 od firmy Thorlabs. Odmeral a stanovil som zorné uhly a citlivosť pre oba fotosenzory. Pomocou vytvoreného programu som spracoval namerané údaje do grafickej podoby. Meranie zorného uhla jednotlivých fotosenzorov danej fotodiódy je považované za pôvodné. Veľkým prínosom tohto merania je overenie usporiadania aktívnych plôch jednotlivých fotosenzorov označované v práci ako „sendvičové“. Pri meraní citlivosti fotodiódy bola preukázaná lineárnosť Si fotosenzora, zatiaľ čo pri InGaAs fotosenzore som nameral pokles citlivosti pri zvýšenom optickom výkone.

LITERATÚRA

- [1] ALEXANDER, S. B.: *Optical Communication Receiver Design*. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1997.
- [2] WILFERT, O.: *Optoelektronika. Skripta*. UREL VUT v Brně, Brno, 2002.
- [3] PFK: Photonic Detectors [online], navštívené 3.12.2012
URL http://www.pfk.ff.vu.lt/lectures/funkc_dariniai/diod/photonic_detectors.htm
- [4] S.B. Alexander, et al.: *4-ary FSK Coherent Optical Communication System*, Electronics Letters, 1990, vol. 26, no. 17, pp. 1346-1348.
- [5] STU Katedra mikroelektroniky: Detektory optického žiarenia [online], navštívené 17.11.2012
URL http://www.kme.elf.stuba.sk/kme/buxus/generate_page.php?page_id=1
- [6] THORLABS [online], navštívené 10.5.2013
URL http://www.thorlabs.de/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=285

ZOZNAM SKRATIEK

- APD - avalanche photodiode (lavínová fotodióda)
- PIN - fotodióda, kde je medzi dvoma dotovanými polovodičmi typu P a N vložená vrstva slabo dotovaného polovodiča, označovaná ako intrinzická
- NEP - Noise Equivalent Power (výkon ekvivalentný šumu)
- FD - fotodióda
- K_{PD} - Prúdová citlivosť fotodiódy (označenie v inej publikácii)

ZOZNAM PRÍLOH

A	Zdrojové kódy	24
A.1	Vytvorenie triedy Meranie.....	24
A.2	Hlavné funkcie v triede MainWindow.....	24

A ZDROJOVÉ KÓDY

A.1 Vytvorenie triedy Meranie

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
namespace Gui
{
    class Meranie
    {
        #region Private Fields
        private double velicinaX = 0;
        private double velicinaY = 0;
        #endregion
        #region Public Properties
        public double VelicinaX
        {
            get { return velicinaX; }
            set { velicinaX = value; }
        }
        public double VelicinaY
        {
            get { return velicinaY; }
            set { velicinaY = value; }
        }
        #endregion
        #region Constructor
        public Meranie()
        {}
        #endregion
    }
}
```

A.2 Hlavné funkcie v triede MainWindow

```
/// <summary>
/// funkcia tlacidla Pridaj
/// </summary>
/// <param name="sender"></param>
/// <param name="e"></param>
private void BtnAdd_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    AddWindow novy = new AddWindow();
    novy.textBlock1.Text = "Meraný uhol v °";
    novy.textBlock2.Text = "Namerané napätie v mV";
    novy.ShowDialog();
    if (novy.GetResult()) //kontrola vysledku okna na zadavanie
    {
        merania.Add(novy.GetData());
    }
    this.DataUhol.ItemsSource = prazdne; //update DataGridu
}
```

```

        this.DataUhol.ItemsSource = merania;
    }

    /// <summary>
    /// funkcia tlacidla vymaz
    /// </summary>
    /// <param name="sender"></param>
    /// <param name="e"></param>
    private void BtnDel_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
    {
        if (this.DataUhol.SelectedIndex >= 0)
        {
            merania.RemoveAt(this.DataUhol.SelectedIndex);
            this.DataUhol.ItemsSource = prazdne;
            this.DataUhol.ItemsSource = merania;
        }
        else
        {
            MessageBox.Show("Vyberte konkrétne meranie!");
        }
    }

    /// <summary>
    /// funkcia tlacidla aktualizuj graf
    /// </summary>
    /// <param name="sender"></param>
    /// <param name="e"></param>
    private void BtnUpdate_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
    {
        Double r = new Double(); //zadana hodnota odporu
        r = (System.Convert.ToDouble(TxtR.Text)) / 1000;
        DataTable table = new DataTable(); //vytvorenie zdroja do grafu
        table.Columns.Add("Uhol", typeof(double));
        table.Columns.Add("Napatie", typeof(double));
        for (int i = 0; i < merania.Count(); i++)
        {
            table.Rows.Add(merania[i].VelicinaX, merania[i].VelicinaY/r);
        }
        TableDataSource data = new TableDataSource(table); //mapovanie
osi grafu
        data.SetYMapping(row => (Double)row["Napatie"]);
        data.SetXMapping(row => (Double)row["Uhol"]);
        grafUhol.Children.RemoveAll(typeof(LineGraph)); //vymazanie
stareho grafu
        grafUhol.AddLineGraph(data, new Pen(Brushes.Blue, 1.5), new
PenDescription("Zorny Uhol fotodiody")); //zobrazenie noveho grafu
(modry, hrubka 1.5, a popis)
        grafUhol.LegendVisible = false; //vypnutie legendy
    }

```