

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA OPTIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Fotometr pro nízké úrovně osvětlení



Vypracoval:
Vedoucí diplomové práce:
Studijní obor:
Rok odevzdání:

Bc. Tomáš Kuchynka, DiS.
RNDr. Ing. Jan Podloucký
Digitální a přístrojová optika
2017

Práce byla zpracována s podporou studentského projektu: IGA_PrF_2016002.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně pod vedením RNDr. Ing. Jana Podlouckého a že jsem v seznamu literatury uvedl všechny použité zdroje.

V Olomouci dne 21. dubna 2017

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce RNDr. Ing. Janu Podlouckému za obětavou spolupráci a čas, který mi věnoval na konzultacích.

Obsah

Úvod.....	5
1 Fotometrie.....	6
1.1 Fotometrické veličiny	8
1.1.1 Světelný tok	8
1.1.2 Svítivost.....	8
1.1.3 Osvětlenost	9
1.1.4 Jas	9
1.1.5 Světlení	9
1.1.6 Osvit	9
1.2 Měření vybraných fotometrických veličin.....	10
1.2.1 Měření osvětlenosti	10
1.2.2 Měření jasu	12
1.2.3 Měření svítivosti.....	12
1.2.4 Měření světelného toku	13
1.3 Metody měření nízkých intenzit světla.....	14
1.4 Chyby měření.....	16
2 Detektory optického záření	18
2.1.1 Fotonka	19
2.1.2 Fotodioda.....	19
2.1.3 Fototranzistor.....	22
2.1.4 Fotorezistor.....	23
2.2 Parametry detektorů.....	24
3 Operační zesilovač.....	29
3.1 Základní zapojení s operačním zesilovačem	30
3.2 Vlastnosti operačních zesilovačů.....	32
4 Návrh přístroje	34
4.1 Blokové schéma	34
4.2 Popis prvků bokového schématu	34
4.2.1 Fotodioda.....	34
4.2.2 Transimpedanční zesilovač	35
4.2.3 Přepínání rozsahů	35
4.2.4 Arduino.....	37
4.2.5 Zobrazovač	38
4.2.6 Napájení.....	40
4.2.7 Přídavné funkce	41
5 Realizace.....	43
5.1 Elektronické schéma přístroje.....	43
5.2 Soupiska součástek	43
5.3 Konstrukce přístroje.....	44
5.4 Vlastní program	45
6 Kalibrace	46
7 Měření	48
7.1 Vyhodnocení výsledků měření	49

Závěr.....	50
Zdroje	51
Seznam příloh	53
Příloha	54

Úvod

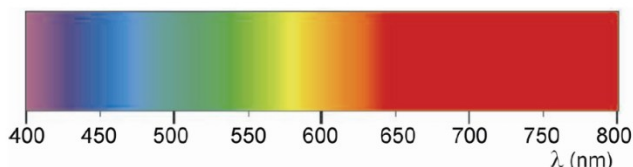
Motivací práce byl požadavek na znalost nízkých hodnot okolního osvětlení při pozorování s přístroji nočního vidění. Znalost světelných podmínek při pozorování s přístroji nočního vidění je žádoucí například z hlediska opakovatelnosti měření. Běžně dostupné komerční přístroje pro měření osvětlení mívají měřicí rozsah od 0,1 lx do 50 000 lx. Ne vždy je takový rozsah dostatečný. Při požadavku na znalost okolního osvětlení za noci bývá dolní limit běžných přístrojů omezující.

Cílem práce bylo seznámit se a vypracovat přehled metod měření nízkých intenzit světla, navrhnout a zrealizovat přístroj pro měření osvětlení v řádu mililuxů a vyhodnotit dosažené výsledky v porovnání s komerčním přístrojem.

Práce je rozčleněna na dvě hlavní části. První část je teoretická, zabývá se popisem fotometrických veličin, jejich měřeními a metodami měření nízkých hodnot intenzity světla. V kapitolách 2. a 3. autor popisuje detektory optického záření a operační zesilovače. Druhá část práce je praktická. Tato část obsahuje návrh přístroje a jeho realizaci. Ve 4. kapitole je uvedeno blokové schéma přístroje s následným popisem jednotlivých bloků. Jsou zde popsána kritéria a důvody výběrů konkrétních součástek. Nedílnou součástí praktické části je autorem vytvořený program v prostředí Arduino IDE, který celý přístroj řídí. Kapitola 6 pojednává o kalibraci přístroje. V kapitole 7 jsou uvedeny výsledky měření, jejich porovnání s komerčním luxmetrem a zhodnocení přesnosti přístroje.

1 Fotometrie

Světlo je elektromagnetické záření, které je charakterizováno svou vlnovou délkou. Pomocí zrakového orgánu, oka, jsme schopni vnímat část tohoto elektromagnetického záření, označovaného jako viditelné spektrum. Pro člověka je za viditelné spektrum považován rozsah vlnových délek od 380 do 780 nanometrů. Viditelné spektrum je znázorněno na obrázku 1.



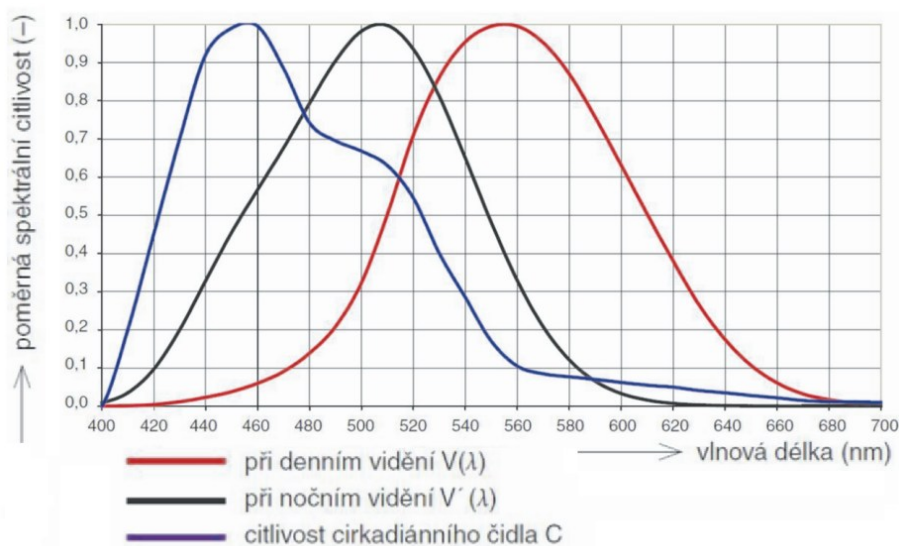
Obrázek 1: Viditelné spektrum. [1]

Měřením elektromagnetického záření se obecně zabývá radiometrie. Záření ve viditelném spektru, kde jako detektor uvažujeme lidské oko (případně detektor se spektrální citlivostí lidského oka), se blíže věnuje fotometrie. Každé radiometrické veličině odpovídá veličina fotometrická, viz přehled veličin v tabulce 1. Fotometrie se uplatňuje všude tam, kde je člověk brán jako detektor. Jedná se například o osvětlení prostor, automobilovou osvětlovací techniku, fotografování a další. Význam fotometrie je patrný, podíváme-li se na základní jednotky v soustavě SI (Le Système International d'Unités). Je zde uvedeno sedm základních fyzikálních jednotek, mezi nimiž je jednotka nazvaná kandela. Definice každé jednotky v soustavě SI je nezávislá na jiných. Kandela je fotometrickou jednotku, jenž je definována jako svítivost monochromatického zdroje o frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz v daném směru a jehož zářivost je v tomto směru $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$.

Radiometrické veličiny		Fotometrické veličiny	
název	jednotka	název	jednotka
zářivý tok Φ_e	W	světelný tok Φ	lumen [lm]
zářivost I_e	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	svítivost I	kandela [cd]
ozáření E_e	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	osvětlenost E	lux [lx]
zář L_e	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	jas L	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$
intenzita vyzařování M_e	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	světlení M	$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$
expozice H_e	$\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	osvit H	lx · s

Tabulka 1: Přehled radiometrických a fotometrických veličin.

Všechny fotometrické veličiny jsou vztaženy na normálního fotometrického pozorovatele. Tímto termínem je reprezentován pozorovatel s definovanou citlivostí napříč viditelným spektrem. Citlivost lidského oka je znázorněna na obrázku 2. V grafu jsou tři křivky. Červená pro denní vidění (fotopické), černá pro noční vidění (skotopické) a modrá křivka, která znázorňuje citlivost cirkadiálního čidla.



Obrázek 2: Spektrální citlivost lidského oka. [1]

Cirkadiální čidla jsou třetím druhem fotoreceptorů, který se nachází v oku. Tyto receptory na rozdíl od tyčinek a čípků neslouží k vidění. Jsou součástí gangliových buněk a jsou velice důležité pro správné řízení biologických pochodů člověka. Tyto pochody, jakými jsou například tělesná teplota, krevní tlak, tepová frekvence, bdělost, pravidelně kolísají v přibližně 24 hodinovém cirkadiálním cyklu. Cyklus se vyvinul na základě střídání světla a tmy v průběhu dne a noci. Na základě informací o setmění dostává organismus, konkrétně epifyza, signál pro zahájení tvorby hormonu melatoninu. Tento hormon je spojen s nutkáním ke spánku a ovlivňuje tak cirkadiální rytmy. Citlivost cirkadiálních čidel je odlišná od citlivosti denního a nočního vidění. Její maximum je posunuto ke kratším vlnovým délkám, směrem k modré barvě. Existuje řada studií, které dávají do spojitosti negativní vliv studeného osvětlení LCD obrazovek (monitorů, mobilních telefonů, tabletů) se sníženou tvorbou melatoninu. [1]

1.1 Fotometrické veličiny

1.1.1 Světelný tok

Světelný tok je zářivý tok vnímaný receptorem se spektrálním průběhem citlivosti odpovídající lidskému oku. Představuje, kolik z celkového zářivého toku vyvolá zrakový vjem za podmínek fotopického pozorovatele. Jednotkou, která popisuje množství světelného toku je lumen [lm].

$$\Phi = K_m \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

Konstanta K_m ve vztahu 1 vyjadřuje maximální míru světelného toku pro zářivý tok 1 W. K_m je rovno $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Tato hodnota platí pro vlnovou délku 555 nm. $V(\lambda)$ je poměrná účinnost monochromatického záření normálního fotopického pozorovatele. [1]

1.1.2 Svítivost

Svítivost je podíl světelného toku a prostorového úhlu, do kterého je tento tok vyzařován. Jednotkou svítivosti je kandela [cd]. Kandela je jednou ze základních jednotek soustavy SI. Svítivost je veličina vztažená k bodovému zdroji. To znamená, že velikost zdroje je zanedbatelná vzhledem ke vzdálenosti od zdroje, kde se svítivost měří. Vztah pro výpočet je uveden níže.

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2)$$

Kde $d\Omega$ je velikost prostorového úhlu. Změříme-li svítivost ve všech směrech prostoru okolo zdroje, získáme prostorové rozložení svítivosti zdroje. V praxi se obvykle uvádí pouze rozložení svítivosti zdroje v řezu. Prostřednictvím řezu dostáváme křivky, které charakterizují svítivosti v daném směru prostoru. Tyto křivky se zobrazují v polárních souřadnicích. [1]

1.1.3 Osvětlenost

Osvětlenost je podíl světelného toku $d\Phi$ a plochy dA , na kterou tento tok dopadá. Jednotkou osvětlenosti je lux [lx].

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (3)$$

1.1.4 Jas

Jas je plošná hustota svítivosti, kde plochou se myslí zdánlivá plocha. Jednotkou jasu je $[\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}]$. Jas závisí jak na ploše, tak i na úhlu pozorování. Povrchy, které mají konstantní jas z kteréhokoliv směru pozorování, jsou nazývány Lambertovskými povrchy.

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos \alpha} \quad (4)$$

Kde dI je svítivosti zdroje, dA je elementární ploška zdroje a α je úhel od normály této plošky, ze které světlo vyzařuje.

1.1.5 Světlení

Světlení má význam plošné hustoty světelného toku $d\Omega$ vyzářeného z plochy dA do celého poloprostoru. Jednotkou je $[\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}]$.

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad (5)$$

1.1.6 Osvit

Osvit je to hustota množství světla, které dopadlo na danou plochu. Jednotkou je $[\text{lx} \cdot \text{s}]$. Je to součin intenzity osvětlení a doby v sekundách, po kterou toto osvětlení působilo.

$$H = E \cdot t \quad (6)$$

1.2 Měření vybraných fotometrických veličin

Fotometrická měření lze rozdělit do dvou skupin v závislosti na druhu použitého detektoru. První z nich je měření subjektivní. Zde je detektorem lidské oko. Druhá skupina je měření objektivní, zde je detektorem čidlo. V současné době se pro fotometrická měření používá převážně metoda objektivní, a to hlavně z důvodu její reprodukovatelnosti a přesnosti. Při objektivním měření je potřeba, aby detektor měl spektrální citlivost odpovídající lidskému oku (fotopickému pozorovateli). Realizuje se to prostřednictvím filtru, kterým se citlivost upravuje na $V(\lambda)$. Ve výjimečných případech mívají detektory spektrální citlivost skotopického pozorovatele. Jako fotometrické detektory se převážně používají polovodičové fotodiody, které pracují na principu vnitřního fotoefektu.

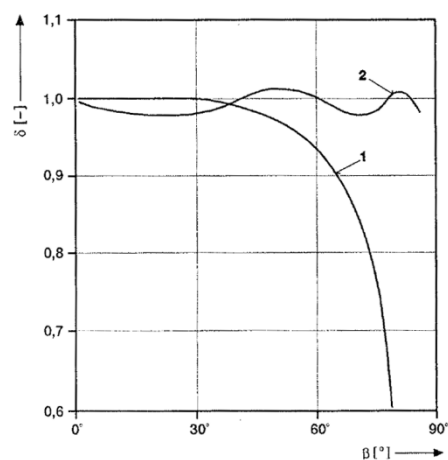
1.2.1 Měření osvětlenosti

K měření osvětlenosti se používá přístroj zvaný luxmetr. Luxmetr obsahuje měřicí hlavici, ve které je detektor, a vyhodnocovací jednotku, kde bývá umístěn displej. Hlavice přístroje může být integrovaná v přístroji nebo může být externí a propojená s přístrojem kabelem. V samotné hlavici přístroje je nejčastěji umístěna fotodioda, pomocí které se dopadající osvětlenost převádí na elektrický signál, který je dále zpracován. Důležitým prvkem je difusor, ten je umístěn před samotnou fotodiódou. Existují tři základní typy difuzorů - planární, kosinový a sférický. S planárním difusorem se můžeme setkat u nejlevnějších přístrojů. Jedná se o rovinný difusor, jehož přesnost měření je závislá na úhlu, pod kterým na něj světlo dopadá. S rostoucím úhlem odchylky od normály detektoru chyba rychle narůstá. Tento typ difusoru v sobě mívají zařízení, jejichž primárním účelem většinou není přesné měření osvětlenosti. Naměřená hodnota je u nich pouze pro informativní účely. Typickým představitelem, který má planární difusor, je mobilní telefon. Jelikož čidlo zde bývá umístěno pod krycím sklem displeje, není zde prakticky možnost použití jiného difusoru. Orientační hodnota osvětlenosti, která bývá čidlem v telefonu naměřena, bývá použita pro automatickou korekci jasu displeje. Druhou skupinou jsou difusory kosinové. Tento typ difuzorů bývá použit u přesných přístrojů. Důvod jeho použití je ten, aby se zabránilo jevu vyšší reflexe pro paprsky, které dopadají šikmo na detektor. Porovnání geometrické chyby s a bez kosinového difusoru je na

obrázku 4. Třetím typem difusoru je sférický. Bývá používán, pokud je třeba měřit kulovou osvětlenost (prostorový úhel 4π). [4]



Obrázek 3: Luxmetr.



1) chyba měření bez kosinového nástavce
 2) chyba měření s kosinovým nástavcem
 Obrázek 4: Chyba měření s a bez kosinového nástavce. [4]

Mezi druhy chyb při měření s luxmetrem patří:

Směrová chyba – je závislá na úhlu detekce, ovlivňuje ji typ použitého difusoru

Spektrální chyba detektoru - při měření v jiném spektru oproti spektru při kalibraci

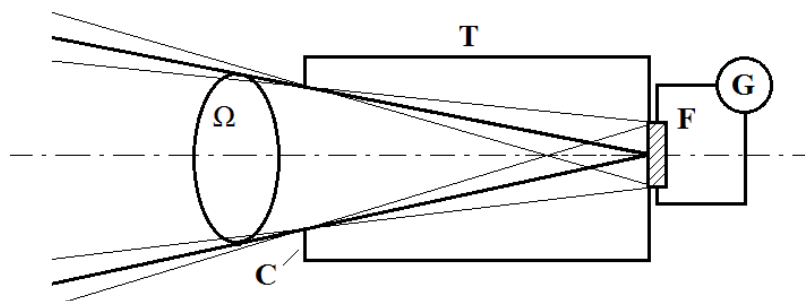
Kvantizační chyba - způsobená konečným počtem bitů A/D převodníku ve vyhodnocovací části měřidla

Chyba stability - způsobená nestabilitou elektronických obvodů v měřidle

1.2.2 Měření jasu

K měření jasu se používá jasoměr. K vysvětlení funkce jasoměru nám pomůže zjednodušený obrázek 5. Na fotočlánek F je nasazen tubus o délce T . Na konci tohoto tubusu je clonka C , která vymezuje prostorový úhel Ω , ve kterém dopadají paprsky z plochy, kterou měříme. Princip je tedy takový, že měříme normálovou intenzitu osvětlení při znalosti prostorového úhlu. Střední hodnota jasu plochy, kterou nám vymezuje clona, se vypočítá pomocí vzorce 7, kde E_N je naměřená hodnota osvětlení. Při měření jasu je potřeba, aby v měřené ploše byl pouze povrch, jehož jas se vyhodnocuje. [5] [6]

$$L = \frac{E_N}{\Omega} \quad (7)$$



Obrázek 5: Princip jasoměru. [6]

1.2.3 Měření svítivosti

Svítivost je možné měřit zprostředkovaně přes měření jasu nebo osvětlení s následným přepočtem. Dále je možné svítivost měřit porovnáním s kalibračním zdrojem.

Při měření svítivosti pomocí luxmetru, postupujeme následovně. Na optickou lavici umístíme zdroj, jehož svítivost v daném směru chceme změřit. V ose zdroje na lavici umístíme čidlo luxmetru a soustavu clon, které zamezí chybě způsobené parazitním světlem. Naměřenou intenzitu osvětlení vynásobíme kvadrátem vzdálenosti detektoru od zdroje.

Při porovnávací metodě se postupuje tak, že na optickou lavici umístíme etalon svítivosti, jehož hodnotu známe. V ose etalonu umístíme na lavici čidlo, kterým snímáme intenzitu osvětlení. Vzdálenost čidla od etalonu by měla být řádově větší než rozměr fotocitlivé části čidla a zářivé plochy zdroje. Čidlo i zdroj by měly zaujímat pozici kolmou

k ose optické lavice. Mezi zdrojem a detektorem je opět soustava clon, která zamezuje zkreslení měření vlivem parazitního světla. Postup je takový, že nejprve změříme vzdálenost l_E (etalonu svítivosti od detektoru) a zaznamenáme si hodnotu osvětlení I_E na detektoru. Následně etalon zaměníme za zdroj, jehož svítivost chceme znát. Zdroj umístíme do takové polohy, aby intenzita osvětlení na detektoru byla shodná jako u osvětlení pomocí etalonu. Nyní si zaznamenáme vzdálenost l_M . Pomocí vztahu 8 pak vypočteme výslednou svítivost. [6]

$$I = I_E \left(\frac{l_M}{l_E} \right)^2 \quad (8)$$

1.2.4 Měření světelného toku

Světelný tok je možné určit ze znalosti svítivostí ve všech směrech v požadovaném prostorovém úhlu. Těto metody například využívají goniofotometry nebo jasové kamery. Dalším způsobem je měření v integrační kouli. Zde se světelný tok určí ze znalosti plochy koule a osvětlení, které na ni dopadá. Geometrie integrační koule je následující. Vnitřní plocha koule je pokryta vysoce odrazivou (okolo 97%) vrstvou síranu barnatého (používá se i sintrovaný teflon, který je z hlediska životnosti více stabilní – méně žlutne). V kouli jsou dva otvory, jeden pro měřený zdroj a druhý pro detektor. Je možné setkat se i s uspořádáním, kde se měřený vzorek umístí doprostřed koule. V obou případech je potřeba clonami uvnitř koule zamezit, aby na detektor dopadalo přímé světlo ze zdroje. Rozměry koule mohou být od několika centimetrů až po jednotky metrů v závislosti na rozměru zdroje, který lze v kouli měřit.



Obrázek 6: Integrační koule. [1]

1.3 Metody měření nízkých intenzit světla

Měření nízkých intenzit lze realizovat několika způsoby. V následujícím textu budou uvedeny čtyři způsoby realizace.

Lavinová fotodioda

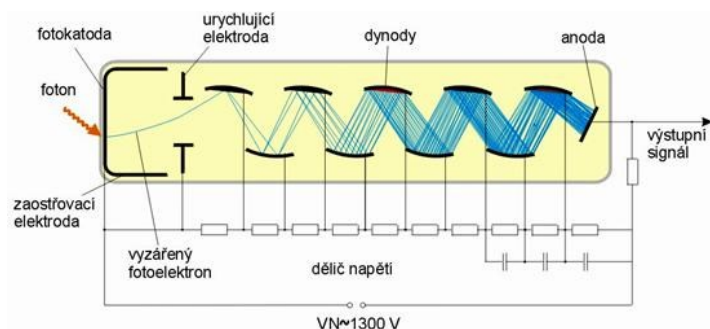
Jako nedostatek u detekce prostřednictvím klasické fotodiody lze chápat fakt, že dopadající foton může vygenerovat pouze jediný pár elektron-díra. To nám do značné míry znesnadňuje detekci velmi malých intenzit světla. Pro měření nízkých intenzit je potřeba mít detektor s vnitřním zesílením. Takovými detektory jsou lavinové fotodiody.

Lavinová fotodioda, stejně tak jako běžná fotodioda, vytváří jako reakci na dopadající foton pár elektron-díra. K fotodiodě je ovšem připojeno v závěrném směru velké napětí (pro InGaAs 30 až 70 V, pro diody na bázi křemíku nad 300 V), to má za následek vznik silného elektrického pole uvnitř fotodiody. Silné elektrické pole způsobuje velké zrychlení elektronů. V krystalové mřížce dochází rychlým pohybem elektronů ke srážkám s atomy. Díky těmto srážkám se vyráží další elektrony a vznikají další páry elektron-díra (sekundární nosiče). Sekundární nosiče jsou rovněž urychlovány silným elektrickým polem a způsobují tak další generaci volných nosičů náboje. Využití tyto diody nachází především v telekomunikacích při přenosech dat prostřednictvím optických kabelů. Při přenosech dat na velké vzdálenosti dochází k velkým útlumům, a proto je vhodné mít co nejcitlivější detektor. [7]

Fotonásobič

K měření nízkých intenzit světla je možné použít fotonásobič. Jedná se o elektronickou součástku, která se skládá z fotokatody a anody, mezi nimiž je ve vakuu soustava dynod. Funkční princip je takový, že dopadající foton na fotokatodě způsobí emisi elektronů. Elektrony jsou následně urychlovány soustavou dynod (běžně 8 až 12). Při dopadu elektronů na každou z dynod následuje emise většího počtu elektronů, které jsou dále urychlovány. Pomocí tohoto systému je možné získat zesílení až 10^8 , což umožní detekci velmi malého množství světla (až jednotky fotonů). Předností je především rychlá

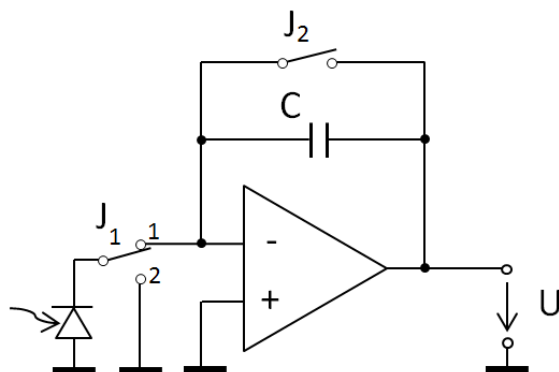
odezva, velký zisk a nízký šum. Hlavní nevýhodou je požadavek na vyšší napájecí napětí, které je potřeba k napájení dynod. Schématický obrázek fotonásobiče je na obrázku 7.



Obrázek 7: Fotonásobič. [10]

Integrační metoda

Tato metoda vychází ze zapojení operačního zesilovače jako integračního zesilovače. Ve zpětné vazbě je zde kondenzátor, na kterém se integruje náboj, který je úměrný fotoproudu generovaného fotodiodou. Princip je následující. Ve výchozím stavu je přepínač J_1 v poloze 1 a spínač J_2 je rozepnutý. Fotoproud, který dodává fotodioda do obvodu, je po stanovenou integrační dobu akumulován v kondenzátoru C . Následně je přepínač J_1 přepnut do polohy 2 a je změřeno napětí U . Nakonec je na krátkou dobu sepnut spínač J_2 , čímž se vybijí kondenzátor C a přepínač J_1 je vrácen do polohy 1. Tento cyklus se automatizovaně periodicky opakuje. Tímto způsobem se získávají hodnoty napětí U , které jsou přímo úměrné osvětlení fotodiody.



Obrázek 8: Integrační metoda.

Transimpedanční zesilovač

Další metoda měření nízkých intenzit světla je pomocí transimpedančního zesilovače s vysokou hodnotou odporu zpětnovazebného rezistoru. Jedná se o zapojení fotodiody s operačním zesilovačem. Fotodioda zde figuruje jako proudový zdroj a operační zesilovač spolu se zpětnovazebným rezistorem jako převodník proud/napětí. Výhodou tohoto zapojení je lineární závislost mezi intenzitou osvětlení a proudem fotodiody. Tato metoda byla v práci zrealizována. Detailnější informace o této metodě a jejím zapojení jsou uvedeny v kapitole 3.1.

Důvodem výběru metody měření s transimpedančním zesilovačem byl hlavně fakt, že přístroj má být napájen z baterií, a to vylučuje použití jak lavinové fotodiody (požadavek na vysoké záporné napětí na fotodiodě), tak i fotonásobiče (vysoké napětí přiváděné na dynody).

1.4 Chyby měření

Chybou měření můžeme nazvat odchylku naměřené hodnoty od hodnoty skutečné. Jako skutečné hodnoty jsou brány hodnoty různých etalonů. U měřicích přístrojů se obvykle udává kategorie přesnosti měřidla. Obecným předpokladem je, že dražší přístroje bývají přesnější, není to ovšem pravidlem. Podle toho, jak se v měření chyby vyskytují, je můžeme rozdělit na náhodné nebo systematické. Pokud je chyba při opakovaném měření stejná, nebo se chová předvídatelně, jedná se o chybu systematickou. Známe-li princip jak tato chyba vzniká, lze ji odstranit pomocí korekce. Pokud se chyba vyskytuje nepředvídatelně při opakovaném měření, jedná se o chybu náhodnou. Takovou chybu můžeme popsat na základě statistické analýzy a potlačit ji opakovaným měřením a zprůměrováním naměřených hodnot. Oba druhy chyb lze vyjádřit absolutně nebo relativně.

Absolutní chybu vypočteme jako rozdíl naměřené hodnoty X_n a skutečné hodnoty X_s .

$$\Delta_x = X_n - X_s \quad (9)$$

Relativní chybu vypočteme tak, že absolutní chybu podělíme skutečnou hodnotou. Pokud chceme relativní chybu vyčíslit v procentech, vynásobíme výsledek ještě stem. [1]

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{X_s} \cdot 100 = \frac{X_n - X_s}{X_s} \cdot 100 \quad (10)$$

Dle normy DIN 5032-7 se luxmetry a jasoměry dělí do čtyř základních tříd přesnosti označovaných písmeny L, A, B, C.

Přesnost	Typ měření	Celková přípustná chyba [%]		Třída	Nutnost kalibrace
		Luxmetry	Jasoměry		
L	Laboratorní	±3	±5	1	jedenkrát za dva roky
A	Přesné	±5	±7,5	2	
B	Provozní	±10	±10	3	jedenkrát za tři roky
C	Orientační	±20	±20	4	jedenkrát za pět let

Tabulka 2: Přípustné chyby luxmetrů a jasměřů. [4]

2 Detektory optického záření

Jsou to elektronické součástky, které jsou schopny převést proud fotonů na měřitelnou veličinu, elektrický signál. Detektory optického záření pracují v různých oblastech spektra, od ultrafialové až po infračervenou. Pracují na principu vnějšího nebo vnitřního fotoelektrického jevu. Při tomto jevu dochází k uvolňování elektronu uvnitř (vnitřní fotoefekt) nebo na povrchu (vnější fotoefekt) materiálu. K fotoelektrickému jevu dochází, má-li dopadající záření větší energii než je výstupní práce nebo šířka zakázaného pásu uvažovaného materiálu. Tato energie je potřebná pro uvolnění elektronu. Rovnice pro fotoefekt má následující tvar.

$$E = h \cdot f_0 + E_k \quad (11)$$

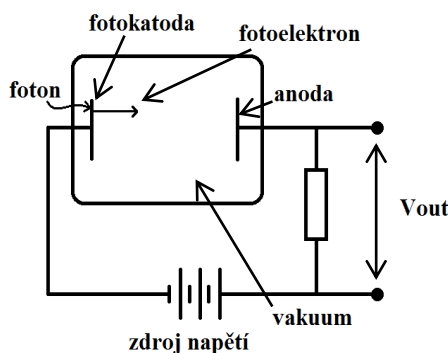
E je energie dopadajícího záření, h je Planckova konstanta, f_0 je mezní materiálová frekvence, E_k je kinetická energie fotoelektronu (elektron uvolněný při fotoelektrickém jevu).

Z rovnice 11 je patrné, že dopadající energie ve formě elektromagnetického záření se z části přemění na energii potřebnou k uvolnění elektronu (výstupní práce) a z části na kinetickou energii E_k fotoelektronu. Vztah nám tedy popisuje zákon zachování energie. [9]

Detektory optického záření lze rozdělit na fotovodivostní, fotovoltaické a fotoemisní. U fotovodivostních dopadající záření zvyšuje elektrickou vodivost polovodiče, patří sem například fotoodpor. Fotovoltaické generují napětí na elektrodách součástky, sem patří fotodiody. U fotoemisních dopadající záření generuje emisi elektronů, představitelem je fotonka, fotonásobič.

2.1.1 Fotonka

Fotonka pracuje na principu vnějšího fotoelektrického jevu. Schéma fotonky je vyobrazeno na obrázku 9. Ve vakuové nebo plynem napuštěné skleněné baňce je umístěna fotokatoda a anoda. Fotony dopadající na katodu vybudí prostřednictvím vnějšího fotoelektrického jevu elektrony (někdy nazývané fotoelektrony), které proudí na anodu. Na výstupu se potom měří elektrický proud. Citlivost vakuových fotonek bývá okolo $100 \mu\text{A/lm}$. Vyšší citlivosti dosahují plynem plněné fotonky (až $200 \mu\text{A/lm}$). Výhodou fotonek je nízký temný proud (řádově pA). Používají se k detekci středních až vysokých zářivých toků. Obdobou fotonky je fotonásobič, který byl popsán v kapitole věnující se metodám měření nízkých intenzit světla.

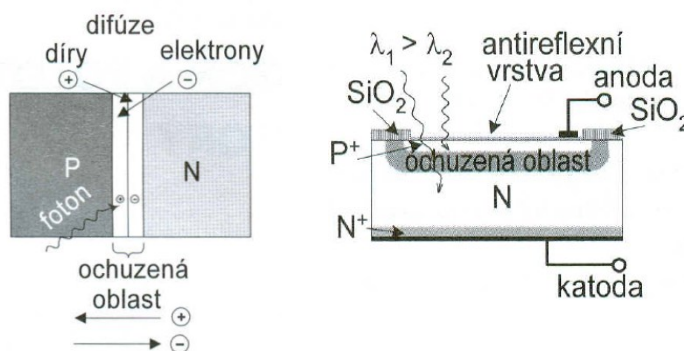


Obrázek 9: Fotonka.

2.1.2 Fotodioda

Fotodioda ke své činnosti využívá vlastnosti PN přechodu. V případě fotodiody je PN přechod upraven takovým způsobem, aby na něj mohlo dopadat optické záření. Mezi nejpoužívanější polovodičové materiály patří křemík (Si) a gallium arsenid (GaAs). V minulosti se používal selen (Se). Vlnová délka detekovatelného záření je například pro křemík od 250 nm do $1,1 \mu\text{m}$. U gallium arsenidu to je pak 800 nm až $2 \mu\text{m}$. V PN přechodu dochází k difúzi děr z oblasti P do oblasti N a difúzi elektronů z oblasti N do oblasti P. Elektrony a díry difundují z oblasti s vyšší koncentrací do oblasti s nižší koncentrací. Dochází tak k tomu, že polovodič N se nabíjí kladně a polovodič P záporně. V blízkosti PN přechodu vzniká tenká oblast nazývaná ochuzená oblast. Tato oblast se projevuje vznikem vnitřního elektrického pole (obrázek 10 vlevo). Pro činnost fotodiody má tloušťka ochuzené vrstvy velký význam. Osvětíme-li přechod světlem vhodné vlnové

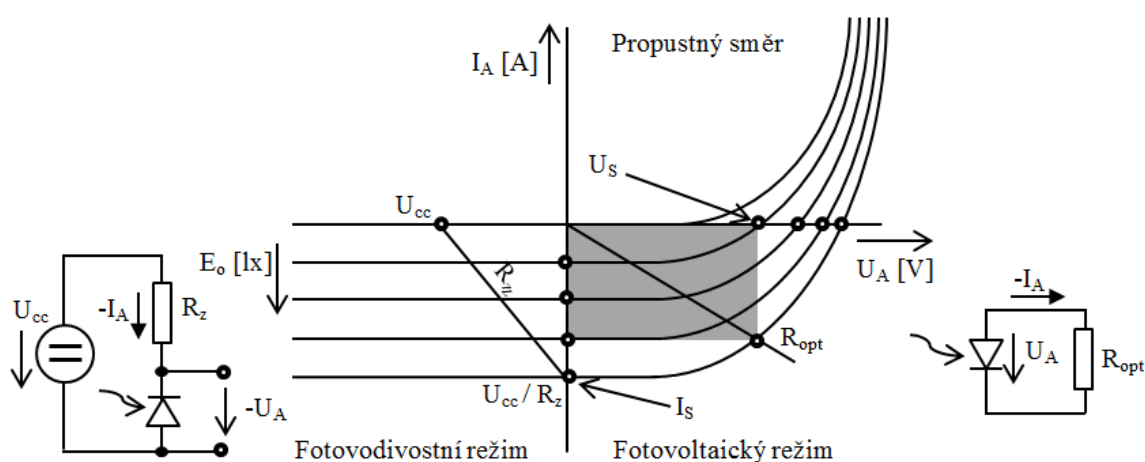
délky (takové, aby energie fotonu překonala šířku zakázaného pásu použitého polovodiče), přejdou elektrony do vodivostního pásu, vznikne pár elektron-díra. Působením vnitřního elektrického pole v oblasti PN přechodu elektrony přejdou do oblasti N a díry do oblasti P. Na každé straně PN přechodu pak vzniká elektrický náboj, který je možné detekovat. Tomuto procesu se říká vnitřní fotovoltaický jev. Na obrázku 10 vpravo je principiální uspořádání fotodiody. Kratší vlnové délky jsou absorbovány tenkou vrstvou (s vodivostí typu P) na povrchu diody. Tloušťka této vrstvy bývá okolo 1 μm a méně. Pro větší vlnové délky se tato vrstva chová průhledně (pro křemík od 120 nm výše). Na povrchu fotodiody bývá nanášena antireflexní vrstva. Tloušťka této vrstvy má vliv na citlivost pro různé vlnové délky dopadajícího optického záření.



Obrázek 10: Fotodiody. [7]

Zapojíme-li fotodiody naprázdno (k fotodiodě není nic připojeno), elektrony (díry) se začnou hromadit v oblasti N (P). Vlivem dopadajícího záření se začne v důsledku fotovoltaického jevu generovat napětí. Zapojíme-li k fotodiodě zátěž (mezním případem je zapojení nakrátko, kdy jsou svorky elektrod fotodiody ve zkratu), elektrony začnou putovat ke katodě a díry k anodě, obvodem začne protékat elektrický proud. Mezi výše uvedenými stavy naprázdno a nakrátko pracuje fotodiody ve fotovoltaickém režimu (někdy nazývaný též „hradlový“). Voltampérová charakteristika se při tomto režimu nachází ve čtvrtém kvadrantu (obrázek 11). Proměnným parametrem charakteristiky je osvětlenost E_o fotodiody. Proud nakrátko I_s je lineárně závislý na osvětlenosti E_o v rozsahu několika řádů. Měření proudu I_s je proto vhodnější než měření napětí naprázdno U_s , které má logaritmickou závislost na E_o a navíc je teplotně závislé. Při zapojení diody ve fotovoltaickém režimu v obvodu není přítomen přídatný zdroj napětí ani proudu. Při neozáření detektoru tak obvodem neprotéká žádný proud (výjimkou je temný proud, který

je velice malý a je zapříčiněn fyzikální podstatou). S výhodou se toho využívá pro měření velmi malých intenzit osvětlení. Fotodioda se prakticky zapojuje do série se zatěžovacím rezistorem a měří se pak proud I_s . Toho, že se fotodioda ve fotovoltaickém režimu chová jako zdroj proudu, se využívá například v solárních panelech. Zatěžovací odpor R_{opt} se volí s ohledem na to, aby do zátěže byl dodán maximální výkon. To nastane tehdy, pokud plocha vymezená obdélníkem vepsaným do VA charakteristiky (pro danou osvětlenost E_o) bude maximální. Výhodou tohoto zapojení je také velký poměrný rozsah výstupního signálu. [7] [13]



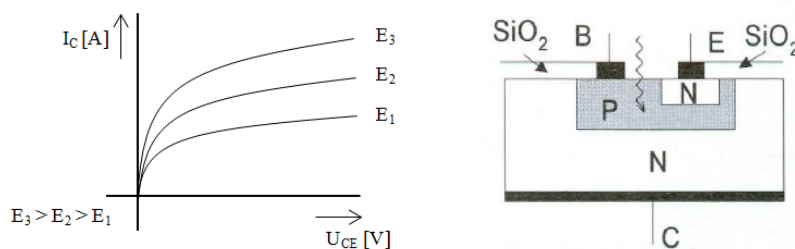
Obrázek 11: Volt-ampérová charakteristika fotodiody, pracovní režimy.

PIN fotodioda

U běžné fotodiody s PN přechodem je nevýhodou malá šířka ochuzené oblasti (oblast pro detekci optického záření). V důsledku toho zanikne (rekombinuje) mnoho párů elektron-díra, které by mohly vygenerovat elektrický proud. U PIN fotodiody je tato vrstva rozšířena. Snižuje se tak pravděpodobnost rekombinace nosičů náboje a v důsledku toho se zvyšuje účinnost fotodiody. Princip je takový, že mezi silně dotovanou vrstvou P a N je vložena vrstva slabě dotovaná. Tato vrstva má vzhledem k vrstvě P a N velmi vysoký měrný odpor, její vodivost je téměř intrinsická (odtud název PIN). Hlavní výhodou PIN fotodiody je její rychlost, která je dána menší kapacitou PN přechodu. Menší kapacita PN přechodu je způsobena větší vzdáleností mezi vodivými oblastmi P a N. U rychlých PIN fotodiody dosahuje mezní kmitočet více jak 100 GHz. [7]

2.1.3 Fototranzistor

Fototranzistor je z hlediska funkce velice podobný klasickému tranzistoru. U fototranzistoru se průchod nosičů náboje řídí intenzitou dopadajícího optického záření. Vyrábí se i v provedení, kde je možné bázi spínat jak optickým zářením, tak i elektrickým signálem. Konstrukčně je fototranzistor uzpůsoben tak, aby dopadající optické záření bylo pohlcováno v oblasti báze. Fototranzistor má dva PN přechody, přičemž přechod emitor-báze je orientován v propustném směru a přechod báze-kolektor v závěrném směru. Fototranzistor funguje na principu vnitřního fotoelektrického jevu. Pohlcované optické záření na bázi generuje páry elektron-díra, které jsou odděleny přechodem kolektor-emitor. V důsledku toho se mění potenciál kolektor-emitor přechodu. Změnou napětí na emitorovém přechodě, který je orientován v propustném směru, se stejně jako u klasického tranzistoru změní kolektorový proud. Nosiče náboje na bázi jsou vtahovány polem přes kolektorový přechod a tím dochází ke vzniku fotoproudu.



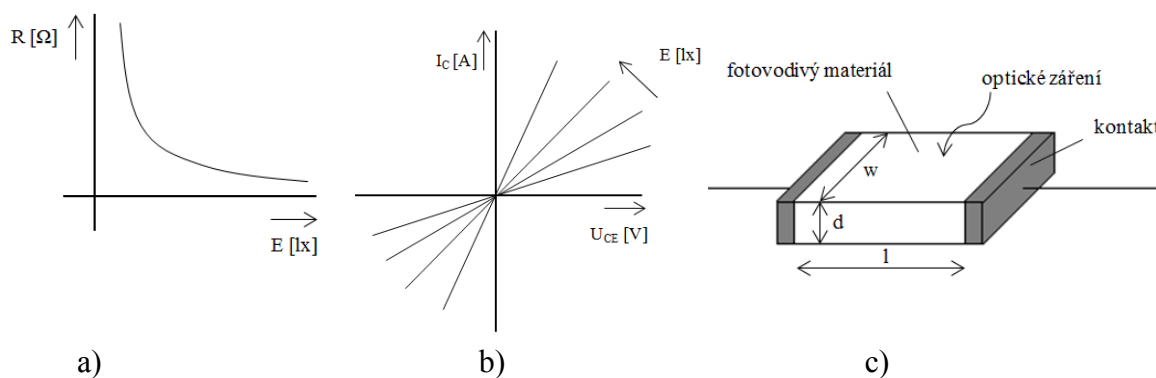
Obrázek 12: VA-charakteristika, schéma fototranzistoru. [7]

Mezi typické zapojení patří obdobně jako u tranzistoru zapojení se společným emitorem a zapojení se společným kolektorem. Nevýhodou fototranzistoru je jeho závislost zesílení na intenzitě dopadajícího optického záření. Používá se například v optočlenech nebo aplikacích, kde je dostačující detekovat pouze světlo/tma (optické závory). Volt-ampérová charakteristika fototranzistoru je v logaritmickém měřítku uvedena na obrázku 12. [7]

2.1.4 Fotorezistor

Je to polovodičová součástka, která se zvyšující se intenzitou osvětlení zvyšuje svou vodivost (snižuje elektrický odpor). Typickou hodnotou odporu R_T fotorezistoru za tmy jsou jednotky megaohmů. Princip je založen na vnitřním fotoelektrickém jevu. Dopadající fotony vybudí elektrony ve valenčním pásu. Pokud je energie dopadajících fotonů dostatečná, přejdou vybudené elektrony z valenčního do vodivostního pásu. Takové elektrony opustí svůj atom a pohybují se krystalovou mřížkou. Tyto volné elektrony v krystalové mřížce zvyšují elektrickou vodivost materiálu. Příklad voltampérové charakteristiky je na obrázku 13 b). Konstrukčně bývá fotorezistor obvykle řešen nanesením hřebenovitých kontaktních elektrod na vrstvu polovodičového materiálu tak, že hranice mezi elektrodami má meandrovitý tvar. Často používané materiály jsou selenid kadmenný (CdS) pro viditelnou oblast a selenid olovnatý (PbS) pro oblast infračervenou. Změnu elektrické vodivosti ΔG charakterizuje vztah 12. Kde μ_n a μ_p jsou pohyblivosti elektronů a děr [$\text{m}^2 \cdot \text{V} \cdot \text{s}$], τ_n a τ_p jsou doby života elektronů a děr [s] a N_t je počet nosičů náboje. Parametry w , d , l jsou geometrické rozměry, viz obrázek 13 c).

$$\Delta G = e \cdot N_t (\mu_n \cdot \tau_n + \mu_p \cdot \tau_p) \cdot \frac{w \cdot d}{l} \quad (12)$$



Obrázek 13: Převodní charakteristika, VA-charakteristika, struktura fotorezistoru. [8]

Převodní charakteristiku odpor-osvětlení popisuje vztah 13, kde R_0 je konstanta při nominálním osvětlení, α_R je teplotní koeficient odporu [K^{-1}] daného materiálu a E je úroveň osvětlení. Parametr R_0 se mění v širokém rozsahu (1 k Ω až 100 k Ω) a je závislý na použitém materiálu a na geometrické stavbě. Převodní charakteristika je vyobrazena na obrázku 13 a).

$$R = R_0 \cdot E^{-\alpha R} \quad (13)$$

Odezva fotorezistoru je oproti jiným detektorům pomalá. Jedná se o desítky až stovky milisekund. Přičemž odezva je závislá na okolní teplotě, úrovni osvětlení a vlnové délce dopadajícího záření. Nevýhodou fotorezistorů je jejich světelný paměťový efekt (pomalá odezva) a silná tepelná závislost. Fotorezistor se při přechodu ze tmy na světlo může ustalovat až desítky minut. Této době se říká zapínací drift. Obdobně dochází ke zpoždění také při přechodu ze světla do tmy, kdy odporu R_T dosahuje až po určité době. Mezi výhody pak patří především dobrá citlivost. [8]

2.2 Parametry detektorů

Kvantová účinnost

Kvantovou účinností η se rozumí pravděpodobnost, že dopadající foton vygeneruje pár nosičů elektrického náboje (elektron-díra), které přispívají ke generaci elektrického proudu v detektoru. Kvantová účinnost nabývá hodnot mezi nulou a jedničkou, přičemž jedničkou se rozumí účinnost maximální. Dopadá-li na detektor současně více fotonů, jak tomu bývá ve většině případů, je η rovno poměru počtu generovaných párů elektron-díra vůči počtu dopadajících fotonů. Je důležité zmínit, že ne všechny fotony dopadající na detektor generují pár nosičů. V důsledku náhodné povahy absorpčního procesu některé fotony nejsou absorbovány. Část fotonů se může od povrchu detektoru odrazit. Některé páry elektron-díra, které se vytvoří v těsné blízkosti povrchu detektoru, rychle rekombinují díky vysoké koncentraci rekombinačních center v tomto místě. V důsledku toho se pak nemohou zúčastnit generace elektrického proudu. Dále pak nepřesnou fokusací světla na fotocitlivou plochu detektoru jsou některé fotony ztraceny. Nepřesná fokusace ovšem není součástí definice kvantové účinnosti, jelikož souvisí spíše s manipulací s detektorem než se samotnými vnitřními vlastnostmi. Výše vyjmenované jevy zapříčiňují snížení kvantové účinnosti detektoru. Vztah pro výpočet kvantové účinnosti je uveden níže. Kde R je odrazivost povrchu detektoru, α je koeficient absorpce materiálu a d je tloušťka detektoru.

$$\eta = (1 - R)\zeta[1 - \exp(-\alpha \cdot d)] \quad (14)$$

Vztah obsahuje tři faktory, které ovlivňují výslednou kvantovou účinnost. První z nich $(1 - R)$, ovlivňuje odrazivost povrchu detektoru. Nanesením antireflexní vrstvy na povrch detektoru může být výsledná odrazivost snížena. Druhý faktor ζ udává množství nosičů, které nezrekombinují u povrchu a podílejí se tak na generaci elektrického proudu. Třetí faktor $[1 - \exp(-\alpha \cdot d)]$, reprezentuje relativní část fotonového toku, který je absorbovaný v materiálu. Při vyšší tloušťce detektoru bude tento faktor vyšší, což je z hlediska vyšší kvantové účinnosti žádoucí. [16]

Je důležité zmínit, že kvantová účinnost závisí na vlnové délce z důvodu závislosti absorpce na vlnové délce. Energie fotonu by měla být tak velká, aby překonala šířku zakázaného pásu, jinak bude foton absorbován materiálem. Konkrétní požadavky na energii fotonu nám stanovuje materiál, ze kterého je fotocitlivá vrstva detektoru vyrobena.

Citlivost

Citlivost dává do souvislosti velikost elektrického proudu vytvořeného detektorem a světelný tok dopadající na detektor. Pokud by každý foton vytvořil jeden elektron, pak by proud fotonů Φ_f vygeneroval proud elektronů Φ_e , který by odpovídal fotoelektrickému proudu $i_p = e \cdot \phi_f$. Optický výkon $P = h \cdot \nu \cdot \phi_f$ závislý na frekvenci ν by potom vytvářel elektrický proud $i_p = (e \cdot P)/(h \cdot \nu)$. Ze znalosti kvantové účinnosti ovšem vyplývá, že podíl fotonů vůči vygenerovaným elektronům není jedna, ale η . Vztah pro generovaný elektrický proud při osvětlení tokem Φ_f je tedy následující.

$$i_p = \eta \cdot e \cdot \phi = \frac{\eta \cdot e \cdot P}{h \cdot \nu} = \Psi \cdot P \quad (15)$$

Koeficient Ψ představuje responsivitu detektoru, jeho jednotkou je $[AW^{-1}]$ a je dán vztahem

$$\Psi = \frac{\eta \cdot e}{h \cdot \nu} = \eta \frac{\lambda_0}{1,24} \quad (16)$$

Ze vztahu je patrné, že citlivost roste s λ_0 [nm], jelikož optické detektory jsou citlivé na tok fotonů, nikoliv na optický výkon. S rostoucí vlnovou délkou je optický výkon přenášen větším počtem fotonů, které následně generují větší počet elektronů. Oblast vzrůstu citlivosti detektoru se zvyšující se vlnovou délkou je ovšem omezená. Důvodem je

závislost kvantové účinnosti na vlnové délce, která klesá jak pro krátké, tak pro dlouhé vlny. Při příliš velkém dopadajícím optickém výkonu na detektor se může citlivost snižovat vlivem saturace detektoru. To má za následek omezení lineárního dynamického rozsahu, tj. oblasti, kde se citlivost detektoru chová v závislosti na dopadajícím světelném výkonu lineárně. [16]

Doba odezvy

Dobu odezvy lze chápat jako určité časové prodlení mezi vygenerovaným signálem a dopadajícím světelným tokem. Je dána součinem dvou faktorů, odporu a kapacity fotodetektoru (RC konstanta detektoru). Kombinace těchto faktorů vede k integraci proudu na výstupu detektoru a následnému prodloužení odezvy. [16]

Šum detektoru

Výstupní signál detektoru $X(t)$ obsahuje dvě složky (proměnné v čase), deterministickou X a stochastickou $x(t)$: $X(t) = X + x(t)$. Deterministická složka představuje užitečný signál, stochastická složka představuje šum. Signálem se ve většině případů rozumí průměrná hodnota dané veličiny (například elektrický proud I_s) za časový interval.

$$\bar{I}_s = \frac{1}{T} \int_0^T I_s(t) dt \quad (17)$$

Směrodatná odchylka signálu je potom dána vztahem

$$\bar{I}_r = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [I_s(t) - \bar{I}_s]^2 dt} \quad (18)$$

Poměrem \bar{I}_s/\bar{I}_r je dán parametr signál/šum. Šumový proud představuje střední kvadratickou hodnotu fluktuace proudu, protékajícího detektorem v určitém kmitočtovém pásmu. [12] Zdroje šumu lze rozdělit na fundamentální (náhodný) a nefundamentální. Fundamentální šum souvisí s detekcí a generací záření. Je to statistický šum při detekci jednotlivých fotonů. Je zapříčiněn fyzikálními jevy a z principu ho není možné odstranit. Mezi fundamentální šumy patří například výstřelový šum nebo tepelný šum (bílý,

Johnsonův šum). Nefundamentální šum je spojen s nedokonalostí detekčního systému, zejména jeho elektroniky a je možné ho omezit.

Výstřelový šum je dán časovou fluktuací elektronů. Je způsoben tím, že světlo je detektorem vnímáno jako nespojitý tok fotonů. Tento typ šumu je nulový pouze pokud na detektor nedopadá žádné světlo, jinak je vždy přítomen. Pro dané frekvenční pásmo Δf lze popsat Schottkyho vztahem

$$I_v = \sqrt{2e \cdot I_\Phi \cdot \Delta f} \quad (19)$$

Kde e je náboj elektronu a I_Φ je proud fotodetektoru.

Tepelný šum (bílý, Johnsonův šum) je způsoben náhodným pohybem elektronů v krystalové mřížce polovodiče, který je způsoben teplotou. Je předpokladem, že každý vodič, který má teplotu vyšší než teplota absolutní nuly, šumí. Tepelný šum je frekvenčně nezávislý, lze popsat vztahem

$$I_{tep} = \sqrt{\frac{4k \cdot T \cdot \Delta f}{R}} \quad (20)$$

Kde k je Boltzmanova konstanta, T je absolutní teplota, R odpor detektoru. [12] Kromě těchto výše uvedených šumů existují i jiné druhy šumu. Výsledný šum je potom dán vztahem

$$I_{celkový}^2 = I_v^2 + I_{tep}^2 + \dots \quad (21)$$

Ekvivalentní šumový výkon

Šum detektoru se charakterizuje parametrem NEP (Noise Equivalent Power). Je to výkon záření, který dopadá na detektor tak, aby vytvořil signál stejně velký jako šum.

$$NEP = \frac{I_s}{\sqrt{\Delta f}} \cdot \frac{1}{S_\Phi} \quad (22)$$

Kde S_Φ je citlivost fotodetektoru.

Detektivita

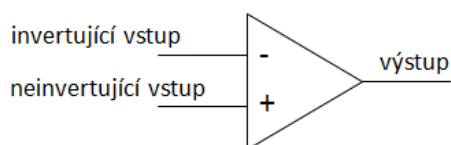
Představuje reciprokou hodnotu ekvivalentního šumového výkonu: $D = 1/NEP$.
Udává měřítko minimální detekovatelnosti. Měrná detektivita je vztažena k ploše S detektoru a šířce přenášeného pásma Δf a je dána vztahem

$$D^* = \frac{1}{NEP} \cdot \sqrt{\Delta f} \cdot \sqrt{S} \quad (23)$$

3 Operační zesilovač

Jedná se o elektronickou součástku, fungující jako zesilovač signálu. Název pramení z dob, kdy se v analogových počítačích zesilovače používaly k realizaci matematických operací. Vlastnostmi se tato součástka blíží ideálnímu zesilovači napětí. Obecně mají operační zesilovače (dále jen OZ) následující vlastnosti. Zesílení bez vnější zpětné vazby je velké (až 10^7), ideálně nekonečné. Vstupní impedance bývá velmi vysoká (až $10^{14} \Omega$), ideálně nekonečná. Výstupní impedance je naopak nízká (okolo 10Ω), ideálně nulová. Kmitočtový rozsah se pohybuje od stejnosměrného signálu až po desítky megahertzů. Šumové vlastnosti a zkreslení bývají na velmi dobré úrovni. Všechny tyto kladných vlastností ovšem nelze dosáhnout současně jedním vnitřním zapojením. A to je hlavním důvodem, proč máme v současné době velké množství různých druhů OZ. Mezi jednotlivé typy patří například rychlé zesilovače, širokopásmové, přístrojové, výkonové, s velkým vstupním odporem, s malým šumem atd. [17]

Základní OZ má dva vstupy, invertující a neinvertující, jeden výstup a napájecí kontakty (ty se zpravidla do schematické značky nekreslí). OZ funguje jako diferenciální napěťový zesilovač, zesiluje rozdíl potenciálů přivedených na vstupy. Pokud je signál přiveden na invertující vstup, bude na výstupu signál fázově otočen o 180° . Je-li signál přiveden na neinvertující vstup, bude na výstupu signál ve stejné fázi jako na vstupu. Schematická značka OZ je na obrázku 14.



Obrázek 14: Operační zesilovač.

Jedním z možných rozdělení je na symetrické a nesymetrické. Symetrické zesilovače jsou napájeny napájecím napětím (například $\pm 15 \text{ V}$). Jejich výhodou je, že výstupní zesílený signál může nabývat i záporných hodnot. Nevýhodou může být složitější konstrukce zdrojové části pro napájení (například v přenosných zařízeních při napájení z baterie). Nesymetrické OZ jsou napájeny nesymetrickým napájením (například 10 V proti zemi) a jsou omezeny pouze na kladný výstupní signál. Jejich použití je tak tímto omezeno jen na některá zapojení.

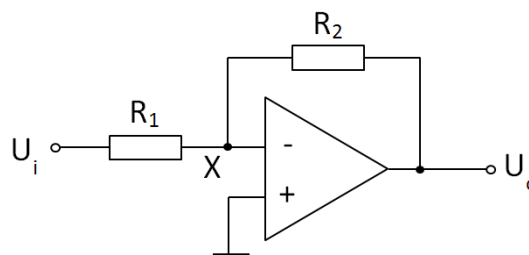
3.1 Základní zapojení s operačním zesilovačem

V této kapitole budou uvedena dvě základních zapojení a jedno zapojení pokročilejší, které bylo v praktické části této práce použito.

Invertující zesilovač

Základním zapojením je invertující zesilovač. Na invertující vstup je přes rezistor R_1 přiveden signál (vstupní napětí), ten je následně zesílen (s opačnou polaritou) a objeví se na výstupu, kde je pak přes zpětnou vazbu prostřednictvím rezistoru R_2 přiveden opět na invertující vstup. Protože má opačnou polaritu, zmenšuje tak vstupní napětí. Jelikož má zesilovač velké (ideálně nekonečné) zesílení, ustálí se obvod ve stavu, kdy je v bodě X velmi malé (ideálně nulové) napětí. Bod X se někdy také nazývá virtuální zem. Signál procházející rezistorem R_1 vyvolá proud I , ten však vlivem velké vstupní impedance zesilovače nemůže téct do vstupu a proto teče přes R_2 na výstup. Zapojení tak vytváří v podstatě odporový dělič s nulovým napětím uprostřed. Neinvertující vstup je zde připojen na zem. Pro nekonečné zesílení zesilovače platí vztah pro výpočet výstupního napětí:

$$U_0 = -\frac{R_2}{R_1} U_i \quad (24)$$

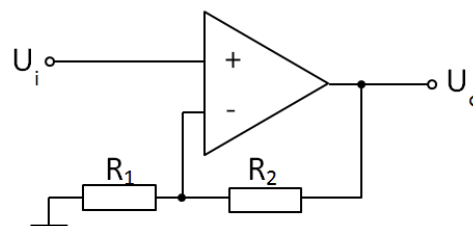


Obrázek 15: Invertující zesilovač.

Neinvertující zesilovač

Dalším zapojením je neinvertující zesilovač. Zde je signál přiveden na neinvertující vstup. Výstup je potom ve stejné fázi jako vstup. Vztah pro výpočet výstupního napětí je:

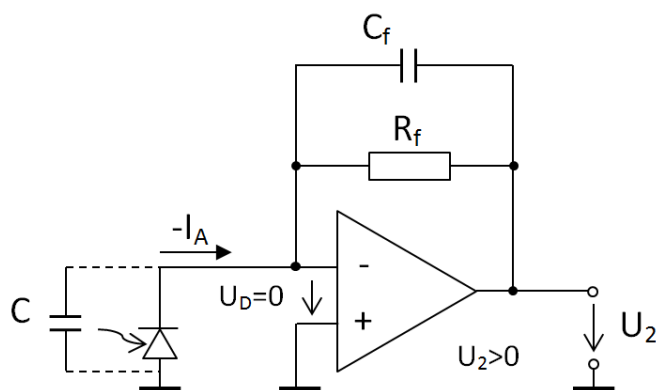
$$U_0 = U_i \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (25)$$



Obrázek 16: Neinvertující zesilovač.

Převodník proud/napětí (transimpedanční zapojení)

V kapitole věnované fotodiodě bylo zmíněno, že pro měření úrovně intenzity osvětlení je vhodné fotodiodu zapojit ve fotovoltaickém režimu. V tomto režimu se využívá voltampérové charakteristiky procházející čtvrtým kvadrantem, kde je intenzita osvětlení lineárně závislá na proudu fotodiody. Fotodioda se potom chová jako proudový zdroj. V transimpedančním zapojení je fotodioda zapojena jako zdroj proudu nakrátko díky virtuální nule na invertujícím vstupu OZ. Výstupní napětí U_2 je potom přímo úměrné dopadajícímu světelnému toku ϕ , protože platí $U_2 = -R_f \cdot I_A$. Z důvodu vysoké vstupní impedance OZ proud I_A teče celý do rezistoru R_f . Ve fotovoltaickém režimu je proud I_A vždy záporný. Polaritu napětí U_2 si můžeme zvolit uzemněním katody (záporné U_2) nebo anody (kladné U_2) fotodiody. V případě této práce bylo použito zapojení s uzemněnou anodou, a to z důvodu použití nesymetrického OZ. Velikostí odporu R_f se nastavuje převodní poměr (transformace) mezi výstupním napětím a vstupním proudem z fotodiody. Z tohoto důvodu se zapojení označuje jako transimpedanční (někdy také jako transresistanční).



Obrázek 17: Transimpedanční zapojení.

Výhoda zapojení spočívá ve velké strmosti převodu proudu na napětí. Další výhodou je také vysoká hodnota odstupů signál/šum. Nevýhodou v klasickém zapojení (bez OZ) je vysoká hodnota parazitní kapacity PN přechodu fotodiody. Tu si lze představit jako kondenzátor paralelně připojený k diodě. Do zapojení se obvykle ještě přidává paralelně k rezistoru R_f kondenzátor C_f , který je zde z důvodu lepší stability obvodu. [13]

3.2 Vlastnosti operačních zesilovačů

Vlastnosti reálných OZ se od těch ideálních liší. Některé odchylky od ideálního OZ lze zanedbat, jiné mohou mít zásadní vliv na parametry celého zapojení.

Vstupní proud operačního zesilovače

U ideálního OZ je vstupní impedance nekonečná, reálně nabývá ovšem konečných hodnot. Z tohoto důvodu potom teče do vstupů OZ proud. Tento proud bývá výrobcem označován jako vstupní klidový proud I_B (*Input Bias Current*). Je udáván jako aritmetický průměr vstupních proudů do OZ při nulovém vstupním signálu. Jeho příčinou je proud tekoucí do báze vstupních tranzistorů, které jsou součástí vnitřního zapojení OZ. Typická hodnota pro běžně používaný OZ 741 (s bipolárními tranzistory) při pokojové teplotě je 500 nA. U OZ s JFET tranzistory je tento parametr výrazně menší. Unipolární OZ mívají přibližně 1000x menší vstupní proud než bipolární.

Vstupní napěťová nesymetrie (offset)

U ideálního OZ platí, že při nulovém rozdílu napětí na vstupu bude výstupní napětí nulové. U reálných OZ tomu tak ale není. Napěťová nesymetrie je napětí, které je potřeba přivést mezi vstupy reálného OZ, aby na výstupu bylo nulové napětí. Tato nesymetrie je způsobena vstupními tranzistory OZ, které nikdy nejsou stejné. Typická hodnota pro OZ 741 je 2 až 6 mV. U OZ s unipolárními tranzistory může být tato veličina až o 2 řády nižší.

Potlačení součtového signálu (CMR)

Jak bylo výše zmíněno, ideální OZ zesiluje rozdíl napětí mezi vstupy. Ve skutečnosti ovšem nelze vyloučit vliv obou vstupů vůči zemi. Koeficient CMR (Common Mode Rejection) určuje schopnost potlačení tohoto součtového signálu. U běžných OZ dosahuje hodnot 70 až 75 dB, u kvalitnějších potom 110 až 140 dB.

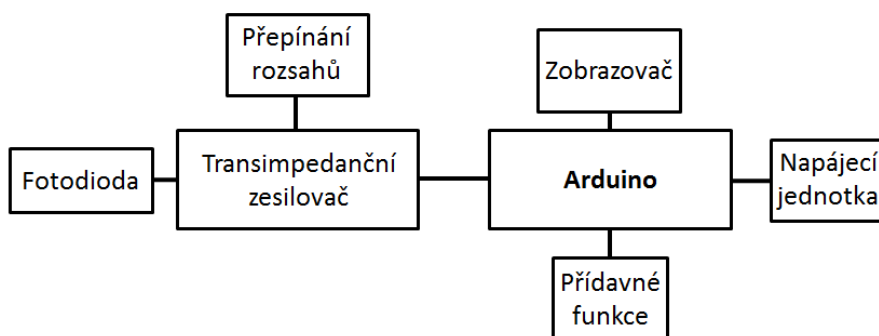
Šumové napětí

Vyjadřuje se šumovým generátorem před součástkou. Je způsobeno nerovnoměrným pohybem elektronů uvnitř materiálu. Jednotkou je $[V/\sqrt{\text{Hz}}]$. Za velice dobré hodnoty jsou považovány jednotky nV. Velikost šumového napětí je ovlivněna materiály, ze kterých jsou vyrobeny jednotlivé polovodičové komponenty OZ. [13]

4 Návrh přístroje

V této kapitole bude uvedeno blokové schéma přístroje, funkce jednotlivých bloků, jejich vlastnosti a kritéria výběru komponent, ze kterých se skládají.

4.1 Blokové schéma



Obrázek 18: Blokové schéma přístroje.

4.2 Popis prvků bokového schématu

4.2.1 Fotodioda

Při výběru detektoru, jehož úkolem je měření intenzity osvětlení, je důležité zaměřit se na to, aby měl spektrální citlivost co nejvíce blízko fotopickému pozorovateli. Dalším sledovaným parametrem při výběru byla odezva samotného detektoru. Tento parametr úzce souvisí s plochou detektoru. Čím bude detekční plocha větší, tím bude fotoelektrický proud větší. Větší fotoelektrický proud je vhodný pro snadnější zpracování dalšími obvody. Z hlediska šumu potom platí, že roste s odmocninou velikosti plochy detektoru. S rostoucí plochou detektoru roste parazitní kapacita, která způsobuje větší vliv napěťového šumu připojeného operačního zesilovače. Bylo tedy vhodné zvolit kompromis mezi velikostí plochy detektoru a uvažovaným šumem a parazitní kapacitou. S ohledem na tato fakta byla vybrána fotodioda Centronic OSD 100-E. Výčet parametrů fotodiody je v příloze 1. Spektrální křivka pro typ 100-E je v grafu pod označením „2“. Katalogový list fotodiody je v příloze na CD.

4.2.2 Transimpedanční zesilovač

K zesílení signálu z fotodiody byl použit nesymetrický operační zesilovač OPA350PA v transimpedančním zapojení. Transimpedanční zapojení bylo použito z důvodu lineární závislosti mezi dopadajícím světelným tokem a výstupním napětím z OZ. Vybrané klíčové vlastnosti OZ jsou uvedeny v tabulce níže. Katalogový list OZ je v příloze na CD. Tento OZ byl zvolen z důvodu nízkého šumu, nízkého napěťového offsetu, nízkých energetických požadavků (díky technologii CMOS), nízkého klidového proudu a v neposlední řadě díky možnosti provozu na nesymetrickém napájení. OZ je typu „rail-to-rail input“, což znamená, že je schopen na výstup dodat napětí téměř rovné vlastnímu napájecímu napětí. V našem zapojení konkrétně 5 voltů.

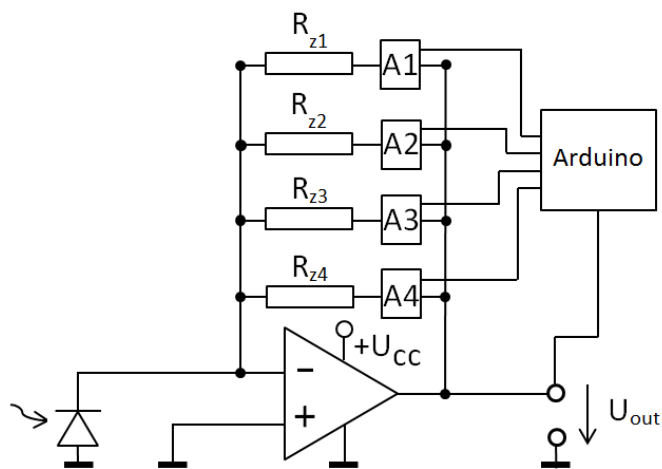
Parametr	Hodnota
Napájecí napětí [V]	5
Šum [nV/\sqrt{Hz}]	5
Offset [μV]	150 (max 500)
Klidový proud [pA]	10

Tabulka 3: Vybrané parametry OZ OPA 350PA.

4.2.3 Přepínání rozsahů

Je předpokladem, že přístroj bude používán převážně k vyhodnocování nízkých světelných intenzit při pozorování s přístroji nočního vidění. Je ovšem vhodné, aby přístroj byl schopen změřit světelné podmínky i ve dne na přímém světle. Tento požadavek nám klade velký nárok na dynamický rozsah. V transimpedančním zapojení je míra zesílení dána velikostí zpětnovazebního rezistoru R_f . Pro pokrytí takto velkého dynamického rozsahu je potřeba, aby rezistor nabýval různých hodnot. Je tedy nutné do zpětné vazby zapojit přepínač rozsahů. Energeticky nejefektivnějším řešením by bylo přepínání rozsahů pomocí kaskády MOSFET tranzistorů. Tyto tranzistory jsou řízeny napětím. Z toho také vyplývá jejich velká úspora energie pro udržení sepnutého stavu. Tento typ přepínání zde ovšem nebyl použit, a to z následujícího důvodu. Nejnižší měřitelný rozsah přístroje je navrhnout na jednotky mililuxů. Při takto nízkých přenášených signálních úrovních je důležité vzít v úvahu i samotné úbytky napětí, které by vznikly na PN přechodech tranzistorů přepínače rozsahu. U MOSFET tranzistorů jsou tyto ztráty malé, ovšem pro

zamýšlené použití nejsou zanedbatelné a do obvodu by to zaneslo chybu měření. Mezi další důvody potom patří velikost svodového proudu mezi řídicí elektrodou a spínaným kanálem, a také nedostatečný odpor kanálu v rozepnutém stavu. Přístroj by se ovšem i tak dal realizovat. Musela by ale být implementována další dodatečná elektronika ve formě OZ jako napěťového sledovače, který by chybu eliminoval. To by vedlo ke složitější konstrukci přístroje, což není žádoucí. Jinou variantou, která zde byla použita, je přepínání rozsahů pomocí elektromagnetického jazýčkového relé. Na této součástce nedochází k významným úbytkům napětí, které by měření negativně ovlivnily. Mírnou nevýhodou relé je jejich energetická náročnost při sepnutém stavu. Z tohoto důvodu bylo voleno nízkopříkonové relé Cosmo RELE S1A050, které pro sepnutí vyžaduje proud 10 mA. Řídicí napětí tohoto typu relé je od 3,75 V. Kritéria pro výběr relé byla následující. Řídicí napětí do 5 V (z důvodu 5 V logiky mikrokontroleru Arduino UNO). Dále bylo požadavkem, aby spínací proud byl co nejnižší z důvodu energetické úspory celého přístroje. Schéma přepínače rozsahů je na obrázku 19. Samotné řízení jednotlivých relé je realizováno pomocí digitálních výstupů Arduino mikrokontroleru.

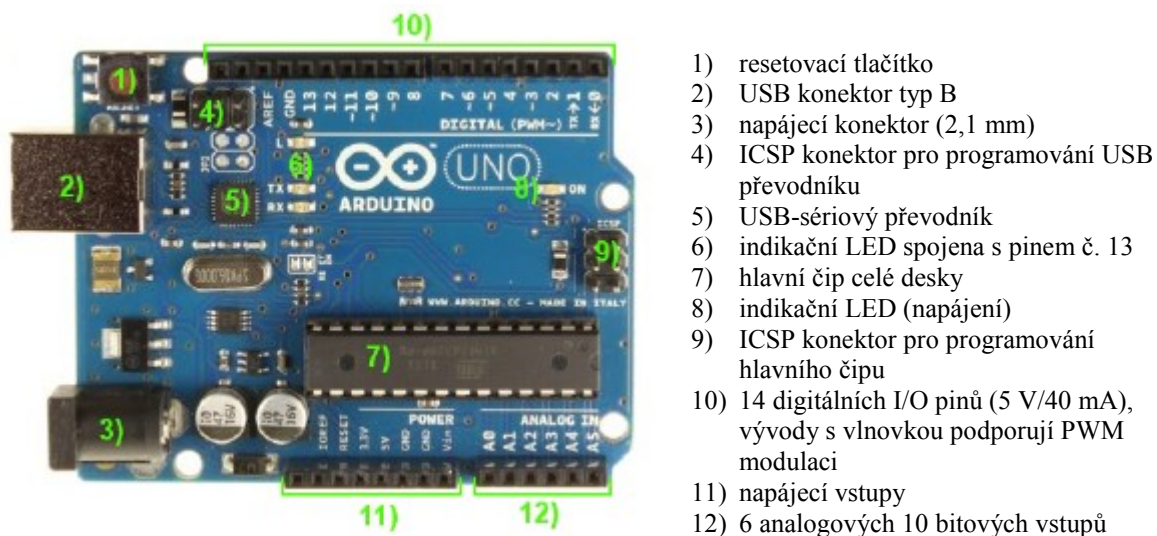


Obrázek 19: Přepínání rozsahů pomocí relé (A1 až A4).

Hodnoty rezistorů ve zpětné vazbě byly voleny s ohledem na odezvu fotodiody. V katalogu výrobce je uvedena odezva 45 nA/lx. Pro nejnižší intenzity byla volena velikost zpětnovazebního rezistoru 500 M Ω , pro další rozsahy potom 5 M Ω , 100 K Ω a 1 K Ω .

4.2.4 Arduino

Jako vyhodnocovací jednotka pro výstupní signál z OZ byl použit mikrokontroler Arduino (typ UNO, revize R3). Arduino je otevřená elektronická platforma založená na jednoduchém hardwaru a vývojovém prostředí IDE sloužícím k tvorbě obslužného programu prostřednictvím programovacího jazyka Wiring. Arduinem lze například získávat data z nejrůznějších snímačů nebo řídit krokové motory. Množství potenciálního využití je veliké. K platformě se prodávají nejrůznější moduly, prostřednictvím kterých je možné realizovat nejrůznější funkce nad rámec vybavenosti základní desky (měření teploty, otřesů, vlhkosti, rotace, detekce látek v ovzduší atd.). Tím, že je Arduino otevřenou platformou, je veškerá technická dokumentace volně dostupná na internetu. Je prakticky možné si v domácích podmínkách vlastní Arduino sestavit na nepájivém poli. Základem každé desky je mikrokontroler Atmel (konkrétní model záleží na typu desky), krystal, napájecí zdroj 5 V a sériový převodník. Ukázka Arduina UNO je spolu s popisem na obrázku 20.



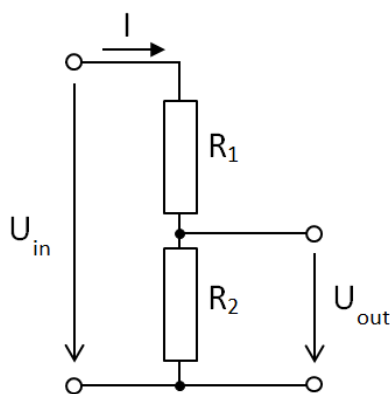
Obrázek 20: Arduino UNO (revize R3). [18]

Vstupní A/D převodníky mají rozlišení 10 bitů. To znamená, že referenční napětí rozdělí na 1024 hladin. V našem případě je jako referenční napětí voleno 5 V z externího stabilizátoru. Tato hodnota je zde zvolena záměrně, jelikož 5 V je maximum, které je

schopen OZ poskytnout na výstupu. Rozlišení přístroje je tedy dáno vztahem $\frac{5}{1023} \doteq 4,89 \text{ mV}$. Nižší napájecí napětí, které by vedlo k vyšší citlivosti, není možné z důvodu minimálních napájecích požadavků OZ. Vyšší napájecí napětí OZ by nemělo smysl, protože by vedlo k horší citlivosti přístroje.

4.2.5 Zobrazovač

Jako zobrazovací jednotka zde byl použit LCD displej s rozlišením 84x48 pixelů. Tento typ displeje je známý jako zobrazovací jednotka z mobilního telefonu Nokia 5110. Displej je pro podobné přípravky velice vhodný zejména z důvodu použití integrovaného řadiče PCD8544, který vyniká svým úsporným provozem díky technologii CMOS. Průměrnou spotřebu výrobce uvádí 300 μA (bez zapnutého podsvícení). Menší nevýhodou tohoto displeje je, že pracuje s 3,3 V logikou. Bylo tedy zapotřebí snížit napětí z 5 V, které Arduino posílá na digitální piny. Snížení se realizovalo pomocí pěti napěťových děličů (jeden dělič na každý signální pin). Bylo třeba zvolit poměr rezistorů v děliči tak, aby byl energeticky co nejefektivnější. Rezistor R_2 se volil 36 k Ω , R_1 se následně dopočítal tak, aby výsledné výstupní napětí odpovídalo přibližně 3,3 V. S ohledem na řadu rezistorů nejvíce vyhovoval rezistor 22 k Ω , při kterém výstupní napětí vychází 3,1 V, což je dle výrobce displeje dostatečná hodnota.



Obrázek 21: Dělič napětí.

$$I = \frac{U_{in}}{R_{celkové}} = \frac{U_{in}}{R_1 + R_2} \Rightarrow U_{out} = U_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (26)$$

$$\frac{5 \cdot R_2}{3,3} - R_2 = R_1$$

$$\frac{5 \cdot 36000}{3,1} - 36000 \doteq 22000 \Omega$$



Obrázek 22: LCD 84x48. [19]

Výpočet proudu, procházejícího děličem

$$I = I_{R1} = I_{R2} = \frac{U_{out}}{R_2} = \frac{3,1}{36000} \doteq 0,861 \mu A$$

Celkový proud (na pěti děličích)

$$I_{celkové} = 5 \cdot I = 5 \cdot 0,861 \cdot 10^{-6} = 4,305 \mu A$$

Výpočet ztrátového výkonu na rezistorech R_1 a R_2

$$P_z = P_{z1} + P_{z2} = R_1 \cdot I^2 + R_2 \cdot I^2$$

$$P_z = 22000 \cdot (0,861 \cdot 10^{-6})^2 + 36000 \cdot (0,861 \cdot 10^{-6})^2 \doteq 43 \text{ nW}$$

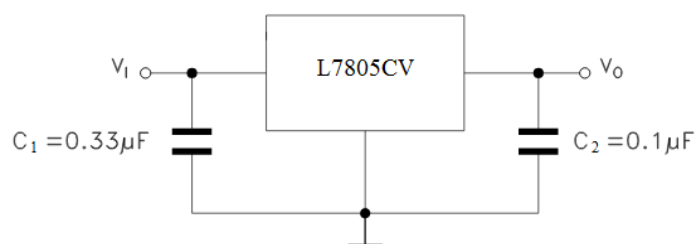
Celkový ztrátový výkon (na pěti děličích)

$$P_{celkové} = 5 \cdot P_z = 5 \cdot 43 \cdot 10^{-9} = 215 \text{ nW}$$

Dle výše uvedených výpočtů se může jevit výhodné zvolit rezistory R_1 a R_2 co největší za účelem co největšího snížení ztrátového výkonu. Dělič s malými odpory představuje „tvrdý“ zdroj napětí. Při jeho zatížení se výstupní napětí mění jen málo. S rostoucí velikostí rezistorů se ovšem dělič napětí stává „měkkým“ zdrojem. To znamená, že při jeho zatížení se výstupní napětí mění, a proto musí mít zátěž vysoký vstupní odpor. Každý vodič je s okolím spojen různými parazitními kapacitami. V bodě, který představuje „měkký“ zdroj napětí, se vlivem těchto parazitních kapacit indukuje větší rušivé napětí než na tvrdý zdroj napětí. S ohledem na výše zmíněnou problematiku byly hodnoty rezistorů voleny jako kompromis mezi přijatelným ztrátovým výkonem a vlivem parazitní kapacity.

4.2.6 Napájení

Napájení celého přístroje je řešeno prostřednictvím šesti mikrotužkových dobíjecích baterií GP 1000. Baterie jsou zapojeny do série a je možnost je přímo v přístroji dobíjet. Pro dobíjení baterií je potřeba k přístroji připojit 12 V zdroj s 2,1 mm konektorem. Pro provoz Arduina je doporučované napájecí napětí 7 až 12 V. Baterie poskytují napětí 7,2 V. Jelikož se jedná o baterie typu NiMH, je výhodou, že napětí 1,2 V na článek v podstatě během vybíjení neklesá. Celková kapacita akumulátorů je 1000 mAh. Arduino je z baterie napájeno přímo, jelikož má v sobě již implementován stabilizátor napětí. Operační zesilovač (OPA350PA) je napájen prostřednictvím externího stabilizátoru L7805CV, který má na výstupu stabilizovaných 5 V (doporučené napětí pro OZ). Samotné Arduino obsahuje rovněž 5 V výstup. Může se tedy zdát být zbytečné do přístroje přidávat další stabilizátor. I když jsou v přístroji použity baterie, které by z principu měly mít pokles napětí při vybíjení minimální, s určitým poklesem se musí počítat. Při experimentálním měření stability 5 V výstupu Arduina bylo zjištěno, že již malý pokles napájecího napětí (v rozsahu 7 až 8 V) ovlivní 5 V výstup z Arduina. Použití 5 V výstupu z Arduina bylo tedy pro napájení zesilovače nevhodné, docházelo by totiž k chybě měření způsobené poklesem napětí na bateriích. Pro přesné zkalibrování úrovně rozlišení přístroje je důležité přivést (na referenční vstup označovaný na desce jako AREF) stabilní napětí. Pro kalibraci analogového vstupu Arduina UNA slouží funkce „*analogReference()*“, ve které lze nastavit tři režimy. Tato funkce nám stanoví, jaké napětí se rozdělí mezi 1024 hladin 10 bitového převodníku. Znamená to, že nelze změřit vyšší napětí než to, které je přivedeno jako reference. Režim DEFAULT znamená, že jako referenční napětí bude použito interní napětí 5 V. Režim INTERNAL znamená, že jako referenční napětí bude použito napětí 1,1 V (výstup z ATmega168). Režim EXTERNAL znamená, že jako referenční napětí bude použito napětí přivedené na vstup AREF. V našem případě byla zvolena možnost EXTERNAL. Na pin AREF bylo přivedeno napětí ze stabilizátoru L7805CV, na které změna napájecího napětí v uvažovaných mezích nemá vliv.



Obrázek 23: Stabilizátor napětí L7805CV. [20]

Integrovaný obvod L7805CV má tři vývody: vstup, zem a výstup. Zapojení je dle doporučení výrobce vhodné doplnit o keramické kondenzátory C_1 ($0,33 \mu\text{F}$) a C_2 ($0,1 \mu\text{F}$), které zabraňují stabilizátoru, aby se „rozkmital“.

Úbytek napětí na stabilizátoru je dle výrobce 2 V, což je, vzhledem k napětí poskytované bateriemi a požadavkům operačního zesilovače, přijatelná hodnota.

Celkový proudový odběr přípravku se pohybuje okolo hodnoty 71 mA. Možná doba provozu přístroje na bateriích je okolo 13 hodin.

4.2.7 Přídavné funkce

Přístroj byl navržen tak, aby automaticky přepínal mezi měřicími rozsahy v závislosti na množství dopadajícího světla na detektor. Tato automatika je řešena softwarově v kódu programu. I přes přítomnost automatického přepínání rozsahů byl přístroj dovybaven možností manuálního přepínání rozsahů. K tomuto kroku zde bylo přistoupeno z důvodu větší přesnosti měření hodnot blízkých hranicím jednotlivých rozsahů.

Přístroj je vybaven funkcí měření kolísavých signálů. Měří-li se například plocha osvětlená zdrojem v podobě žárovky nebo zářivky, bývá zde problém se střídavou složkou napájení těchto zdrojů. V praxi to znamená, že naměřená hodnota osvětlení osciluje mezi minimem a maximem funkce (u žárovky funkce sinus s frekvencí 100 Hz), kterou je světelný zdroj modulován.

Mezi další přídavnou funkci, kterou je přístroj vybaven, patří monitorování stavu baterie. Jak již bylo výše zmíněno, pomocí funkce „*analogReference()*“ a zvolení módu

EXTERNAL se nastavilo jako referenční napětí 5 voltů. Tento krok z principu vylučuje měření napětí vyšších, než je tato stanovená hodnota. Jelikož plně nabitá baterie má přes 7,2 V, musel zde být před samotným měřicím vstupem implementovaný dělič napětí se stejnými hodnotami rezistorů R_1 a R_2 . Takový dělič nám pak vstupní napětí sníží na polovinu. Detekované napětí je pak následně v programu násobeno koeficientem 2x. Tímto postupem lze obejít omezení měřitelného vstupního napětí v podobě 5 V.

Použití přístroje je plánováno i ve venkovních klimatických podmínkách. Z tohoto důvodu byl do přístroje implementován jednoduchý měřič vlhkosti (DHT11), kterým se dá ověřit správné utěsnění šasi přístroje. Součástí tohoto senzoru je i teploměr.

5 Realizace

V této kapitole bude popsána realizace přístroje.

5.1 Elektronické schéma přístroje

Elektronické schéma je přiloženo v příloze 3. Schéma bylo vytvořeno v programu Eagle.

5.2 Soupiska součástek

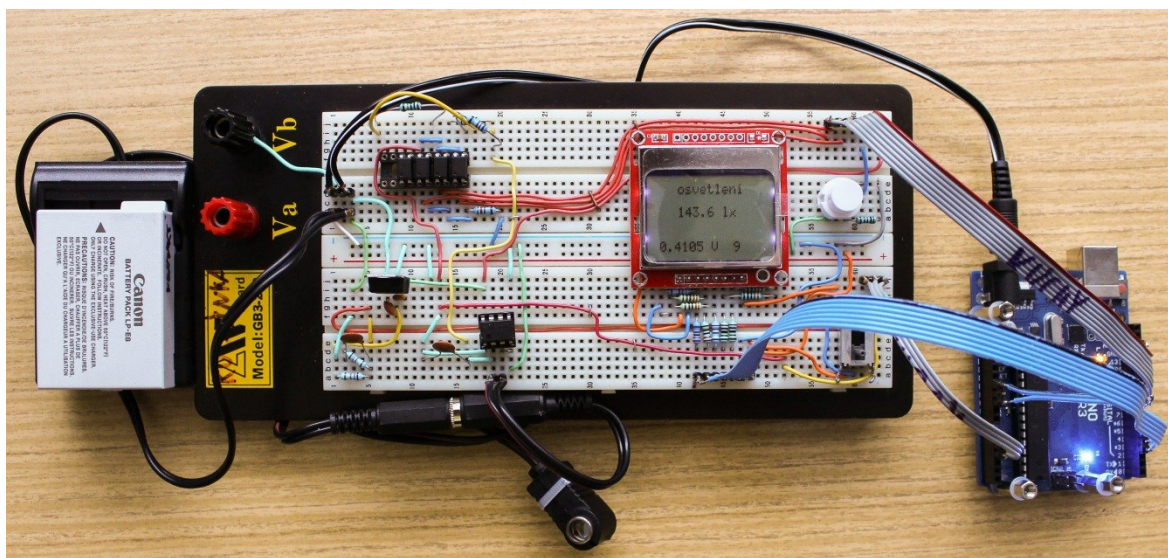
Součástka	Hodnota
Baterie	7,2 V (6 x 1,2 V, AAA)
Pouzdro baterie	Pouzdro 6 x AAA
B1	tlačítko
B2	tlačítko
B3	tlačítko
B4	tlačítko
C1	10nF
C3	0,1uF
C4	0,33uF
D1	OSD 100-E
D2	1N4004
D3	1N4004
D4	1N4004
D5	1N4004
D8	1N4004
IC1	L7805CV
IC2	LM317LZ
IC3	OPA350PA
K1	RELES1A 050
K2	RELES1A 050
K3	RELES1A 050
K4	RELES1A 050
LCD_5110	LCD_5110
Q1	ARDUINO_UnoR3
R1	10K
R2	8R2
R3	1K

R4	100K
R5	5M
R6	500M
R7	470R
R8	22K
R9	22K
R10	22K
R11	22K
R12	22K
R13	36K
R14	36K
R15	36K
R16	36K
R17	36K
R18	10K
R19	36K
R20	36K
R21	1K
R22	150R
U\$1	DHT11
Krabička hlavní	UK51P
Krabička detektor	RX2010/S-5
konektor 2,1 mm	samec + 2x samice
Adaptér 15 V	MW3G15GS
deska plošných spojů	50 x 100 mm
lišta	BLW808G
kolíkový konektor	S1G40

Tabulka 4: Soupiska součástek.

5.3 Konstrukce přístroje

Před samotnou konstrukcí finální podoby přístroje bylo vhodné funkčnost budoucího přístroje ověřit na nepájivém poli. Tento krok byl velice užitečný, jelikož se zde dala ověřit správná funkce jednotlivých bloků. Na základě toho se ještě před samotnou konstrukcí přístroje daly provést dodatečné úpravy v jednotlivých blocích. Mezi zmiňovanými úpravami bylo například přidání filtračních kondenzátorů nebo přidání napěťového děliče pro měření stavu baterie. Dále se zde odlaďoval počet tlačítek a jejich funkce a intenzita podsvícení displeje. V průběhu odlaďování byly místo relé použity optrony, jak je z obrázku 24 patrné. Důvodem byla nedostupnost relé u prodejce v době, kdy byl vyvíjen algoritmus na automatické přepínání rozsahů. Je důležité zmínit, že ve fázi, kdy byl přípravek sestaven na nepájivém poli, nebyla prováděna přesná kalibrace měřicích rozsahů. A to z důvodu toho, že samotné nepájivé pole se díky své konstrukci do jisté míry chová jako anténa. Pole je tak schopno na sebe navázat rušivé signály z okolí, které by mohly přesnou kalibraci znemožnit. Na obrázku 24 je rovněž vidět jiný typ baterie a fotodiody, než který byl ve finále použit. Důvodem bylo ověření schopnosti provozu budoucího přístroje, ještě před samotným nákupem konkrétních komponent.



Obrázek 24: Podoba měřicího přístroje ve fázi odlaďování.



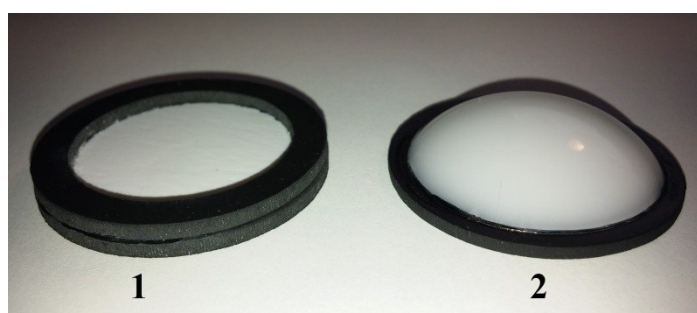
Obrázek 25: Výsledná podoba přístroje.

5.4 Vlastní program

Samotný program je přiložen na CD v příloze. Program byl vytvořen v softwaru Arduino IDE verze 1.6.5. Program obsahuje 431 řádků kódu.

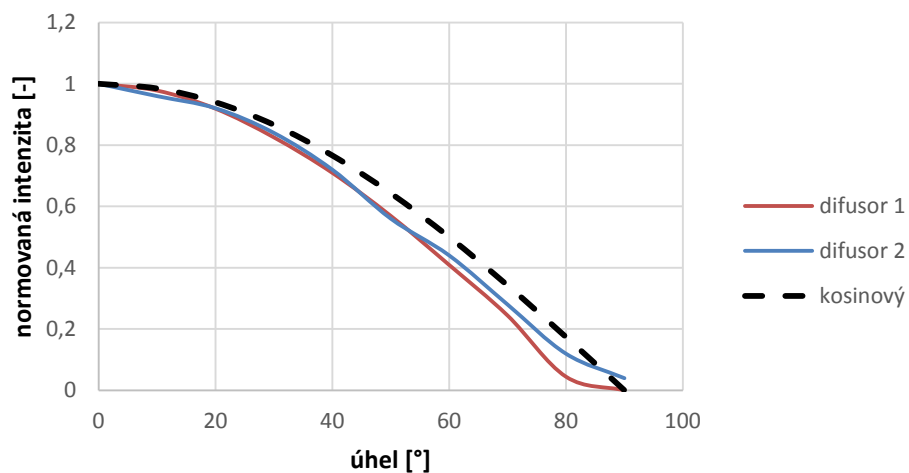
6 Kalibrace

K detektoru přístroje bylo potřeba vyrobit co nejvhodnější difusor. Požadavky byly takové, aby směrová charakteristika odpovídala co nejvíce charakteristice kosinové a aby propustnost difusoru byla co nejvyšší. Na základě těchto vstupních požadavků byly vyrobeny dva odlišné difusory (viz obrázek 26), které byly následně v optické laboratoři proměřeny. Na obrázku 27 jsou vyobrazeny směrové charakteristiky obou difusorů. Propustnost, která byla změřena za pomoci integrační koule, činila 12 % pro difusor 1 a 49 % pro difusor 2. Dle těchto změřených parametrů byl vybrán difusor 2.



Obrázek 26: Vyrobené difusory.

Směrové charakteristiky difusorů



Obrázek 27: Směrové charakteristiky difusorů.

Kalibrace přístroje s vybraným difusorem probíhala v laboratoři na optické lavici. Na jeden konec lavice se umístila lampa s halogenovou žárovkou a irisovou clonou. Geometrie lampy byla taková, aby světlo vycházelo pouze otvorem, který se clonou dal

regulovat. Touto geometrií lampy se zamezilo chybě kalibrace vzniklé odrazem světla od stěn laboratoře. Na druhém konci lavice se umístilo čidlo přístroje spolu s čidlem luxmetru Gossen Mavolux 5032B (specifikace přístroje jsou uvedeny příloze 2). Pomocí clony se nastavovaly různé úrovně osvětlení obou čidel najednou. Regulace množství světla pomocí clony byla vhodná z důvodu neměnného vyzařovaného spektra na rozdíl od regulace proudu protékajícího žárovkou. Bylo nezbytné mít obě čidla v těsné blízkosti osy zdroje, aby se co nejvíce eliminovala chyba měření způsobená vyosením zdroje a detektoru. Podle naměřených hodnot na komerčním luxmetru a napětí na detektoru sestrojeného přístroje se přepočtem stanovila kalibrační konstanta přístroje. Pro každý měřicí rozsah bylo takto naměřeno několik hodnot pro přesnější určení kalibračních konstant.

7 Měření

S přístrojem byla provedena sada kontrolních měření na třech různých místech. První z míst bylo v laboratoři na optické lavici, dále potom na přímém slunečním světle a třetí ve vnitřních prostorách fakulty u okna. Pro porovnání se měřily stejné scenérie i s komerčním luxmetrem se kterým byla provedena kalibrace. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 5. Dle údajů výrobce luxmetru Mavolux spadá přístroj do třídy přesnosti B. U třídy B se uvádí přípustná chyba měření do 10 %. V tabulce 5. jsou uvedeny absolutní a relativní chyby měření mezi sestrojeným přístrojem a přístrojem Mavolux. Odchyłky se pohybovaly od 0,08 % do 12,03 %.

Měření	Naměřené hodnoty [lx]		Chyba		Rozsah sestrojeného přístroje	Poznámka
	Mavolux 5032B	Sestrojený přístroj	Absolutní [lx]	Relativní [%]		
1.	0,09	0,098	-0,008	-8,89	R.1	laboratoř
2.	0,20	0,211	-0,011	-5,50	R.1	laboratoř
3.	0,64	0,563	0,077	12,03	R.2	laboratoř
4.	1,69	1,658	0,032	1,89	R.2	laboratoř
5.	5,04	5,036	0,004	0,08	R.2	laboratoř
6.	12,36	12,32	0,04	0,32	R.2	laboratoř
7.	37,60	34,49	3,11	8,27	R.3	laboratoř
8.	276,0	248,0	28	10,14	R.3	laboratoř
9.	75000	73056	1944	2,59	R.4	venkovní prostory
10.	99400	100011	-611	-0,61	R.4	venkovní prostory
11.	99600	100034	-434	-0,44	R.4	venkovní prostory
12.	1115	1072	43	3,86	R.4	chodba fakulty (u okna)

Tabulka 5: Naměřené hodnoty.

7.1 Vyhodnocení výsledků měření

V tabulce 5. jsou uvedeny výsledky měření, které byly dosaženy se sestrojeným přístrojem. Odchylka měření od přístroje Mavolux se pohybovala od 0,08 % do 12,03 %. Největší odchylka činila 12,03 %. U tohoto měření jsme se pohybovali na začátku druhého rozsahu přístroje. Vysvětlením větší odchylky by mohla být možná nelinearita zesílení operačního zesilovače na začátku tohoto rozsahu. Druhá nejvyšší odchylka činila 10,14 %. U tohoto měření jsme byli již na hranici možností maximálního osvětlení prostřednictvím zdroje se clonkou. Zdroj byl při tomto měření již relativně blízko detektorům a bylo potřeba subjektivně pohybem zdroje nalézt maxima osvětlení pro každý detektor zvlášť. Jelikož se stejným způsobem postupovalo i při kalibraci tohoto rozsahu, nelze vyloučit odchylku způsobenou subjektivním nalezením maxima při kalibraci a měření. Úkolem kalibrace sestrojeného přístroje bylo, aby naměřené hodnoty byly co nejvíce blízké hodnotám naměřeným s přístrojem Mavolux. Dosáhnout totožných hodnot při různých scénériích je z principu nemožné. Do výsledné odchylky přístroje zasahuje několik faktorů. Prvním faktorem je, že oba detektory nemají totožné spektrální charakteristiky. Z toho vyplývá, že naměření blízkých hodnot je prakticky možné pouze pro měření osvětlení ve spektru, ve kterém byl přístroj kalibrován. Dalším faktorem, který ovlivní měření je geometrie difusoru. Při kalibraci bylo potřeba umístit oba detektory velice blízko k optické ose zdroje. Zdroj bylo vhodné umístit do větší vzdálenosti od detektorů, aby se eliminovala chyba geometrie difusorů. Z tohoto postupu tedy vyplývá, že blízkých hodnoty by přístroje dosahovaly za podmínek osvětlení malým zdrojem z velké vzdálenosti.

Závěr

Úkolem práce bylo navrhnout a sestrojít přístroj, pro měření intenzity osvětlení v řádu mililixů. Výsledkem práce je přístroj schopný měřit intenzity osvětlení v rozsahu od 0,001 do 120 000 lx. Přístroj funguje na platformě Arduino UNO a byl naprogramován v softwaru Arduino IDE. Jako detektor byla vybrána fotodioda Centronic OSD 100-E se zabudovaným filtrem upravujícím její spektrální charakteristiku na tvar podobný citlivosti lidského oka, jejíž signál je zesilován nízkošumovým operačním zesilovačem OPA350PA. Jako zobrazovací jednotka byl zde použit monochromatický displej známý z mobilního telefonu Nokia 5110. Napájení je řešeno šesti mikrotužkovými dobíjecími akumulátory. Přístroj disponuje schopností automatického rozpoznání a přepínání měřicích rozsahů. Pro preciznější měření je vybaven možností přepnutí do manuálního režimu s ruční volbou rozsahů. V přístroji je implementován algoritmus pro měření kolísavých signálů při osvětlení žárovkou nebo zářivkou. Jednou z přídatných funkcí přístroje je měření vlhkosti, které je zde jako kontrola utěsněnosti přípravku před vniknutím venkovní vlhkosti. Součástí práce je manuál k přístroji, který je volně vložen v příloze.

V šesté kapitole je uveden postup kalibrace přístroje. V sedmé kapitole jsou uvedeny výsledky měření se sestrojeným přístrojem a jejich porovnání s komerčním luxmetrem Mavolux 5032B. Průměrná odchylka přístroje od komerčního luxmetru se pohybovala od 0,08 % do 12,03 %. Velikost odchylky ovlivňuje hlavně spektrální charakteristika detektoru a geometrie difusoru.

Jedním z mnoha přínosů této práce pro mne bylo porozumění a naučení se programování s Arduinem. V této otevřené platformě vidím velký potenciál a do budoucna mám v plánu se platformou zabývat jako koníčkem. Dále pro mne bylo přínosem zkušenost při práci v dílně na mechanickém realizování přístroje, kde bylo potřeba upravit šasi přístroje, navrhnout a napájet modulovou desku, která se následně připojila na Arduino.

Zdroje

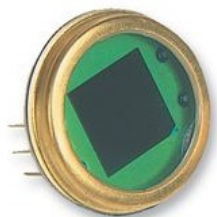
- [1] Sokanský K.: Světelná technika, České Vysoké Učení Technické, Praha, 2011
- [2] Fraden J.: Handbook of modern sensors, Third Edition, San Diego, 2004
- [3] Bass M.: Handbook of optics, third edition, The McGraw-Hill Companies Inc., 2010
- [4] Plch J.: Světelná technika v praxi, IN-EL, Praha 1999
- [5] Plch J.: Osvětlení neosvětlených prostor, ERA group spol. s.r.o., Brno, 2004
- [6] Habel: Světelná technika a osvětlování, FCC Public, Praha, 1995
- [7] Doleček J.: Optoelektronika a optoelektronické prvky, BEN, Praha, 2015
- [8] Husák M.: Mikrosenzory a mikroaktuátory, Academica, Praha, 2008
- [9] Encyklopedie fyziky, [online], Dostupné z URL:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/723-fyzikalni-podstata>
- [10] Encyklopedie fyziky, [online], Dostupné z URL:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/747-fotonasobic>
- [11] Rieke G.: Detection of Light From the Ultraviolet to the Submillimeter, Cambridge University press, 2002
- [12] Otruba V.: Laboratoř atomové spektrochemie - Fotodetektory, Masarykova Univerzita, Brno, 2011
- [13] Vobecký J., Záhlava V.: Elektronika Součástky a obvody, principy a příklady, Grada publishing, a.s., 2005
- [14] Willers C.: Electro-optical System Analysis and Design A Radiometry Perspective, SPIE PRESS, Washington USA, 2013
- [15] Trishenkov, M. A.: Detection of Low-Level Optical Signals: Photodetectors, Focal Plane Arrays and Systems, Kluwer Academic Publishers, 1997

- [16] Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich: Základy fotoniky svazek 3, John Wiley & sons, Inc., 1991
- [17] Láníček R.: Elektronika-obvody-součástky-dějě, Ben-technická literatura, Praha, 1998
- [18] Voda Z. & tým HW Kitchen: Průvodce světem Arduina
- [19] Obrázek LCD displeje [online: <https://www.sparkfun.com/products/10168>]
- [20] Katalog Jameco Electronics: L7800 series
- [21] Katalog fotodiody Centronic OSD-100-E
- [22] Katalog přístroje Gossen Mavolux 5032B/C

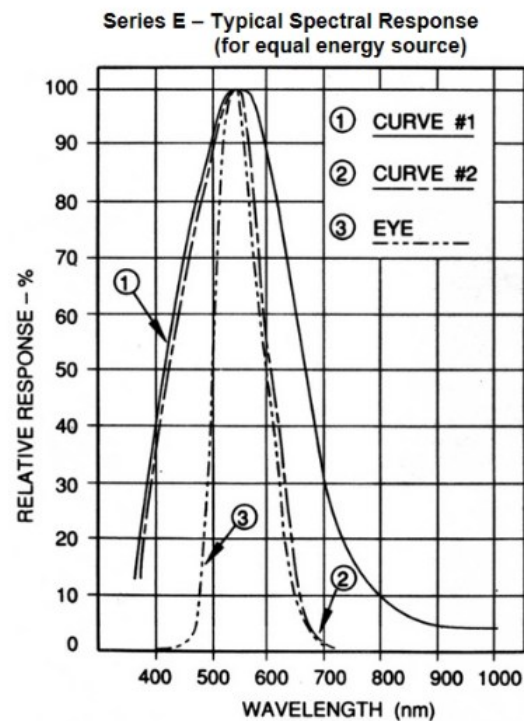
Seznam příloh

- Příloha1 Katalogové hodnoty fotodiody Centronic OSD 100-E.
- Příloha2 Specifikace přístroje Gossen Mavolux 5032B.
- Příloha3 Elektronické schéma sestrojeného přístroje.

Příloha



Type No.	Active Area		Responsivity nA Lux-1		Dark Current nA		NEP WHz ^{1/2} λ = 550 nm	Capacitance PF Typ.		Shunt Resistance Megohms	
	mm ²	mm	Typ.	Min.	Max.	Typ.	Typ.	Vr=0V Max.	Vr=12V Max.	Min.	Typ.
OSD100-E	100	11.3 dia	45	60	100	20	1.210e-13	2500	520	1	15



Příloha 1: Fotodioda Centronic OSD 100-E. [21]



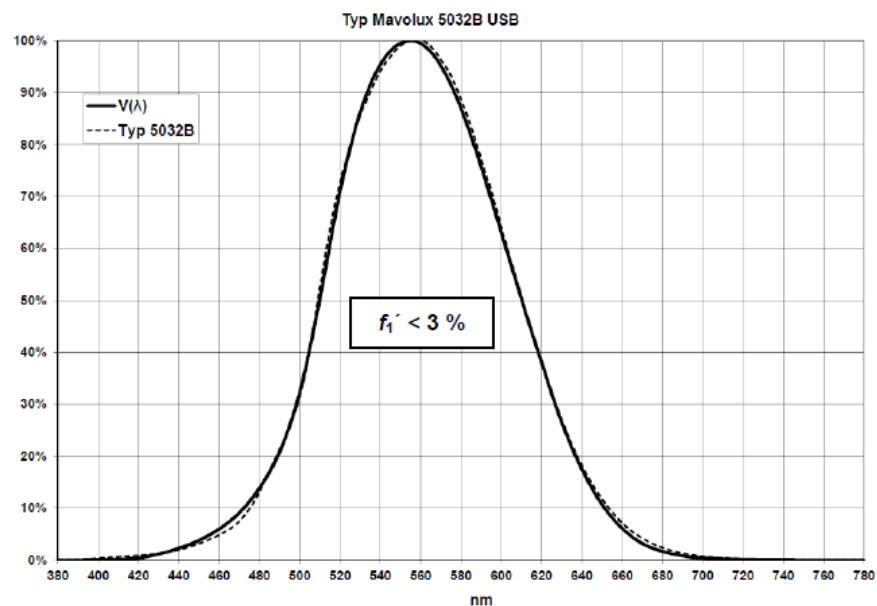
Characteristics MAVOLUX 5032 B USB

Measuring Quantity		Measuring Range in Lux (lx)		Measuring Range in footcandle (fc)		Resolution in lx	Resolution in fc
		I	II	III	IV	V	
Illumination	I	0.01... 199.9	0.001... 1 999	0.01	0.001	0.01	0.001
	II	0.1... 199.9	0.01... 199.9	0.1	0.01	0.1	0.01
	III	1... 1 999	0.1... 199.9	1	0.1	1	0.1
	IV	10... 19 900	1... 1 999	10	1	10	1
	V	100... 199 000	10... 19 990	100	10	100	10
		in Candela/m ² (cd/m ²)		in footlambert (fL)		in cd/m ²	in fL
Luminance with luminance attachment for cd/m ² or fL	I	0.1... 199.9	0.01... 19.99	0.1	0.01	0.1	0.01
	II	1... 1 999	0.1... 199.9	1	0.1	1	0.1
	III	10... 19 990	1... 1 999	10	1	10	1
	IV	100... 199 900	10... 19 990	100	10	100	10
	V	1000... 1 999 000	100... 199 900	1000	100	1000	100

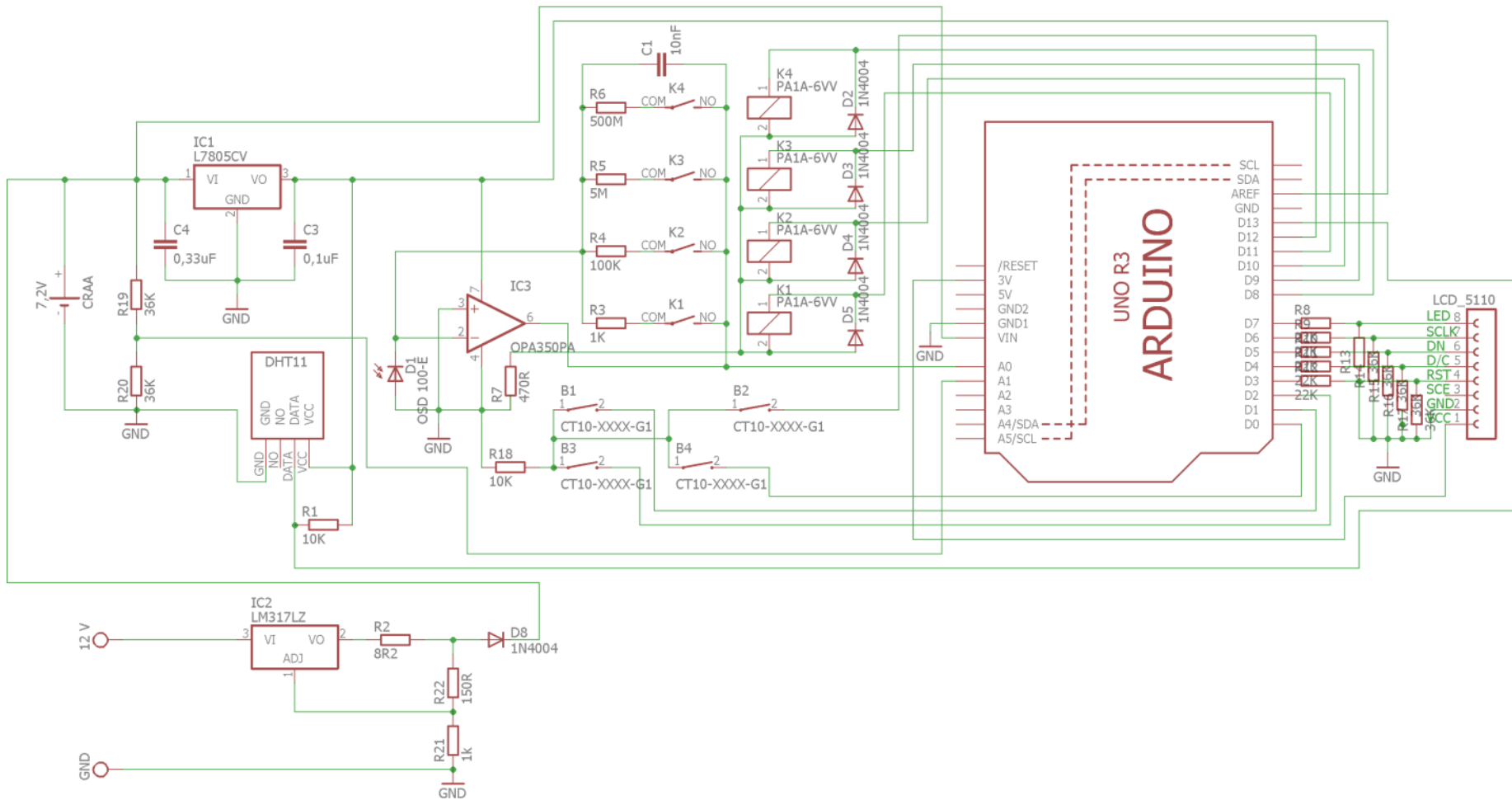
Most Important Error Limits MAVOLUX 5032 B USB

Characteristics	Admissible Error according to DIN 5032 Class B	Typical Error MAVOLUX 5032 B USB
$V(\lambda)$ -Adaptation (f_1)	6%	3.0%
True Cosine Evaluation (f_2)	3%	2.0%
Linearity (f_3)	2%	1.0%
Adjustment Error (f_{11})	1%	0.8%
Overall Error (f_{ges})	10%	~ 8.0%

$V(\lambda)$ -Adaptation (f_1) MAVOLUX 5032B USB



Příloha 2: Specifikace přístroje Gossen Mavolux 5032B. [22]



Příloha 3: Elektronické schéma sestaveného přístroje.