



**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

**Luxmetr**

Luxmeter

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

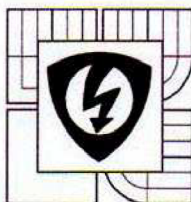
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Jiří Vitek

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií  
Ústav radioelektroniky

## Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Jiří Vítek

**Ročník:** 3

**ID:** 119669

**Akademický rok:** 2010/11

**NÁZEV TÉMATU:**

**Luxmetr**

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Na základě systémového návrhu vypracujte obvodové řešení luxmetru pro měření v rozsahu 50 - 1000 lx s bateriovým napájením. Práce musí obsahovat teoretický rozbor problematiky, celkové schéma zapojení, výkres plošného spoje a soupisku součástek.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PLCH, J. Světelná technika v praxi. IN-EL, Praha, 1999.

[2] ROZMAN, J., SADOVSKÝ, P., ČERMÁK, D. Diagnostika životního prostředí. Skriptum. Brno: FEI VUT v Brně 2000.

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 27.5.2011

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Rozman, 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.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Luxmetr jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor bakalářské práce na téma Luxmetr dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Jiřímu Rozmanovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....  
podpis autora

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá metodou měření pracovního osvětlení a návrhem jednoduchého luxmetru s rozsahem měření 50 – 1000 lx. Práce obsahuje podrobný popis jednotlivých detektorů, návrh zapojení včetně popisu jednotlivých funkčních bloků. Pro celé zařízení je proveden návrh desky plošných spojů.

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with a method of measuring working illumination and with a design of basic luxmeter, which has a range of measurement 50-1000 lx. The thesis contains a detailed description of individual detectors, a design of luxmeter connection and also includes a description of individual functional blocks. For the whole apparatus is performed a suggestion of the printed circuit boards.

## **Klíčová slova**

Luxmetr, osvětlení, detektor, fotodioda

## **Keywords**

Luxmeter, lighting, detector, photodiode

## **Bibliografická citace**

VÍTEK, J. *Luxmetr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 44 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.



## Obsah

Seznam obrázků .....	7
Seznam tabulek .....	8
1. Úvod do problematiky .....	9
2. Měření osvětlení .....	9
2.1. Základní veličiny .....	10
2.1.1. Světlo .....	10
2.1.2. Světelný tok $\phi$ .....	12
2.1.3. Svítivost I .....	12
2.1.4. Intenzita osvětlení E .....	12
2.1.5. Jas L .....	12
2.1.6. Fotoelektrický jev .....	13
2.2. Typy optoelektronických detektorů .....	13
2.2.1. Fotorezistor .....	14
2.2.2. Fototranzistory .....	15
2.2.3. Fototyristor .....	16
2.2.4. Vakuové fotonky .....	17
2.2.5. Fotočlánky .....	17
2.2.6. Kosinový nástavec .....	18
2.2.7. Fotodiody .....	19
3. Systémový návrh luxmetru .....	21
3.1. Blokové schéma .....	21
3.2. Popis obvodových prvků .....	22
3.2.1. Snímací prvek .....	22
3.2.2. Napěťový zesilovač .....	24
3.2.3. Převodník A/D .....	25
3.2.4. Zobrazení .....	26
3.2.5. Napájení .....	28
3.2.6. Sériový stabilizátor napětí .....	28
4. Obvodové řešení .....	29
4.1. Použitý detektor .....	30
4.2. Popis schématu zapojení .....	30
4.5. Výkres plošných spojů .....	34
4.6. Soupiska součástek .....	36
5. Dosažené výsledky, zhodnocení .....	38

Literatura .....	40
Seznam zkratk .....	41
Seznam příloh.....	41

## Seznam obrázků

1	Šíření světla ve vakuu.....	10
2	Rozklad bílého světla na barevné složky.....	11
3	Fotoelektrický jev.....	13
4	Rozdělení kvantových detektorů optického záření.....	14
5	Fotorezistor .....	14
6	Náhradní elektrické schéma fototranzistoru.....	15
7	Voltampérové charakteristiky fototranzistoru.....	16
8	Voltampérová charakteristika fototyristoru.....	16
9	Vakuová fotonka a její charakteristika.....	17
10	Srovnání citlivosti fotočlánků.....	18
11	Hradlový fotočlánek.....	18
12	Základní typy kosinových nástavců.....	19
13	Náhradní obvod fotodiody.....	19
14	Pracovní režimy fotodiody.....	20
15	Pracovní režimy fotodiody.....	21
16	Blokové schéma luxmetru.....	21
17	Fotodioda BPW21 .....	22
18	Spektrální závislost fotodiody BPW21.....	24
19	Závislost výstupního proudu a napětí na intenzitě osvětlení .....	24
20	Příklad schematické značky OZ TLC274 se zavedenou zpětnou vazbou.....	25
21	Pájecí body .....	27
22	Panelové měřidlo.....	28
23	Blokové schéma třibodového sériového stabilizátoru.....	29
24	Výroba sondy.....	30
25	Příklad zapojení monolitického stabilizátoru 78L06.....	31
26	Celkové schéma zapojení.....	33
27	Spodní strana desky (vrstva Bottom).....	34

28	Vrchní strana desky (vrstva Top).....	35
29	Osazení součástek.....	36

## **Seznam tabulek**

1	Charakteristika fotodiody BPW21 .....	23
2	Maximální rozsah fotodiody BPW21.....	23
3	Přepínání rozsahů.....	27
4	Seznam součástek.....	37
5	Přípustné chyby luxmetrů pro jednotlivé typy měření.....	38

# 1. Úvod do problematiky

Světlo je pro člověka především prostředkem k přenosu a získání informací o prostředí, které ho obklopuje. Podíl přijatých informací – vjemů, je pomocí zrakového orgánu u průměrného jedince a za normálních okolností přibližně 80 – 85 %. Vezmeme-li v úvahu, že podle mezinárodních statistik se tentýž jedinec, vzdálený přírodnímu prostředí, pohybuje až 90 % svého života v krytých prostorech, je otázka kvalitního umělého osvětlování důležitá nejen z pohledu jeho zdraví, ale i vývoje. Umělé osvětlení je v životním prostředí člověka vzhledem k měnícímu se životnímu stylu stále významnější, a proto se umělým osvětlením snažíme přiblížit podmínkám, na které je oko navyklé.

Stávající normy pro umělé osvětlení vnitřních prostorů člení prostory do čtyř základních kategorií. Dále tyto kategorie, jimž přísluší odpovídající činnost, stanovují hygienická minima průměrného osvětlení, rovnoměrnosti osvětlení a dalších parametrů.

Dobré osvětlení pracovních míst ve výrobních podnicích patří nejen k důležitým činitelům racionalizace výroby, zvyšování produktivity práce, ale i zvyšování bezpečnosti při práci. Má tedy podstatný vliv na zlepšování pracovního prostředí člověka. Námaha zraku při špatném osvětlení urychluje a zvyšuje únavu organismu, způsobuje vyšší vypětí a vzrušivost nervového systému, může se promítat i do psychických reakcí. Platí to nejen pro pracovní, ale i obytnou a rekreační složku včetně osvětlení venkovních prostorů - chodníků, vozovek a prostranství. Dokonalejším uličním osvětlením po setmění lze snížit počet dopravních nehod až o 1/3. V tomto smyslu je proto osvětlení i mezním činitelem a proto se významně podílí na tvorbě životního prostředí, [2].

Cílem bakalářské práce je seznámit se s metodou a způsobem měření intenzity osvětlení v pracovním prostředí, vypracovat systémový návrh luxmetru a jeho obvodové řešení.

## 2. Měření osvětlení

Obor, který se zabývá měřením světelné energie v oblasti viditelného záření s ohledem na vlastnosti normálního zraku, je *fotometrie*. Metody měření světelně technických veličin dělíme na subjektivní a objektivní. Subjektivní či vizuální metody využívají zraku, objektivní nebo také fyzikální metody využívají fotometrické přístroje. Fotoelektrické snímače mohou pracovat ve spojitém nebo impulsním režimu. Výstupní veličina je závislá lineárně nebo logaritmičtě na veličině vstupní. V současné době je většina měření prováděna detektory, [2].

Intenzita osvětlení se měří luxmetrem. Snímačem či detektorem je zpravidla fotodioda s předřazeným korekčním filtrem, selenový nebo křemíkový fotočlánek. Spektrální vlastnost lidského zraku je respektována zavedením odpovídající korekce. Možná chyba při měření osvětlovacích soustav se žárovkami dosahuje 5 %, soustav s výbojkami až 50 %. Provozní luxmetry bývají konstrukčně řešeny s oddělením detektoru a vyhodnocovacích obvodů. Pro měření malých hodnot intenzit osvětlení jsou součástí luxmetrů i odpovídající zesilovače.

Obecně je třeba při měření respektovat závislost světelného toku zdroje na napájecím napětí a na teplotě okolí, podobně jako u fotočlánků. Dosahovaná chyba měření bývá minimálně 10 %.

Měření umělého osvětlení se provádí v různých místech kontrolní (srovnávací) roviny, volba měřících míst je závislá na rozmístění a počtu svítidel. Metodiku měření a vyhodnocení střední hodnoty intenzity osvětlení udává ČSN 360011, [1].

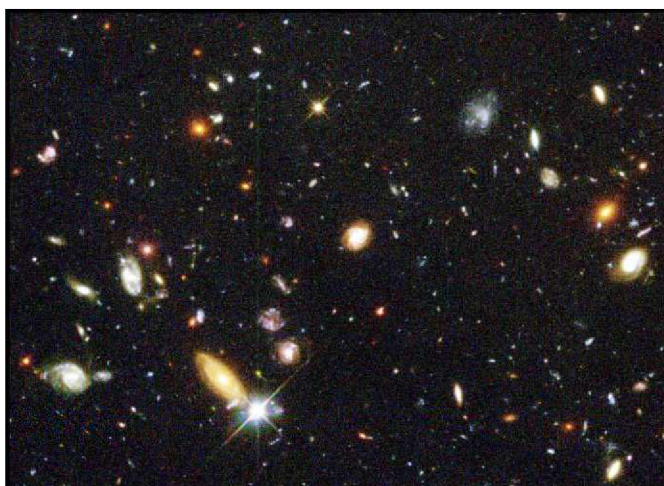
## 2.1. Základní veličiny

### 2.1.1. Světlo

Světlo, jako viditelná část spektra elektromagnetického záření, je zhodnocováno zrakovým orgánem. Působí na fyziologické, biochemické i psychické funkce organismu. Zrak patří mezi nejdůležitější a nejcitlivější smyslové orgány člověka - práh citlivosti pro zelenou barvu světla je  $5 \cdot 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Prostřednictvím zraku získáváme z okolního prostředí téměř 80 % všech informací. Příjemný psychofyziologický stav, při kterém plní zrak optimálně svou funkci a člověk má pocit, že nejen dobře vidí, ale cítí se i psychicky dobře, se označuje jako zraková pohoda. Tento stav ovšem souvisí s prostorovým a barevným členěním prostředí - výtvarným řešením a užitým uměním, [2].

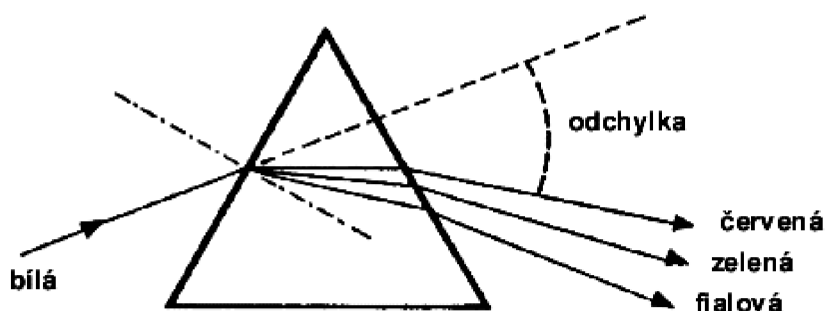
Nejznámější vlastnosti světla jsou:

- a) Šíření světla ve vakuu



Obrázek 1: Šíření světla ve vakuu [3]

## b) Rozklad bílého světla na barevné složky



Obrázek 2: Rozklad bílého světla na barevné složky [3]

## c) Rychlost světla - konečné vyřešení problému vytvořil James Clerk

**Maxwell** v roce 1865 – vytvořil známou soustavu diferenciálních rovnic (Maxwellovy rovnice), které shrnovaly známé zákonitosti elektrostatického pole, magnetostatického pole, elektromagnetické indukce a vytváření magnetického pole kolem vodiče protékaného proudem. Poté již bylo možno ukázat, že tato soustava má řešení v podobě příčného elektromagnetického vlnění nesoucí energii (proto se může nazývat záření) a ve vakuu se šíří rychlostí  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [3]

S vývojem poznání o vlastnostech zraku se měnily i názory na kvalitu osvětlení. Kvalitní osvětlení má zabezpečit nejen dostatečné množství světelné energie, ale i její vhodné prostorové časové rozložení. Zrakové pohody v životním prostředí dosáhneme jak přírodním - denním, tak i umělým sdruženým osvětlením. Význam umělého osvětlení neustále roste. S tím ovšem souvisí odpovídající energetické nároky - požadavek na více než 10 % veškeré vyrobené elektrické energie, [2], [3].

## Základní veličiny a jednotky z oboru světla

Základním úkolem světelné techniky je studium, rozbor a realizace prostorového rozdělení výkonu přenášeného záření. Zrakový orgán nemá schopnost vnímat souhrnné působení světla za určitou dobu. Pro naše vidění proto není důležité celkové množství světelné energie vyzářené zdrojem za určitý čas, ale výkon - množství energie za jednotku času, které označujeme jako zářivý tok.

Světelné technické projevy respektují rozdílnou citlivost oka ke světlu různých vlnových délek. Ta je u jednotlivých pozorovatelů odlišná. Základem je spektrální citlivost oka normálního pozorovatele.

Všechny světelné jednotky byly odvozeny z jednotky svítivosti, která jediná je realizovatelná a jejíž velikost byla fyzikálně stanovena: kandela [cd], [2].

### 2.1.2. Světelný tok $\phi$

Světelný tok označuje světelnou energii, kterou zdroj vyzáří za časovou jednotku o velikosti 1s. Je to však energie posuzovaná z hlediska citlivosti oka na různé vlnové délky světla. Světelný tok je tedy fotometrická veličina. Jednotkou světelného toku je **lumen [ lm ]**. Lumen je jednou z vedlejších jednotek soustavy SI. Je definován jako světelný tok vyzařovaný do prostorového úhlu 1 steradiánu bodovým zdrojem, jehož svítivost je ve všech směrech 1 kandela, [13].

$$\phi = 638 \int_0^{\infty} V(\lambda) \cdot J(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

V..... Spektrální světelná účinnost záření [-]

J ..... Spektrální hustota výkonu vyzařování zdroje světla [W]

### 2.1.3. Svítivost I

Svítivost je prostorová hustota světelného toku vyzařovaného bodovým zdrojem [cd]. Za bodový zdroj můžeme prakticky považovat každé svítidlo, jehož největší rozměr je zanedbatelný vůči vzdálenosti l zdroje od kontrolního bodu. Jednotkou svítivosti je **kandela [cd]**. Je jednou ze sedmi základních jednotek soustavy SI. Je to svítivost světelného zdroje, který v daném směru emituje (vyzařuje) monochromatické záření o frekvenci  $540 \times 10^{12}$  hertzů, jehož zářivost (zářivá intenzita) v tomto směru činí 1/683 wattů na jeden steradián. Zvolená frekvence je z viditelného spektra, blízká světlu zelené barvy při vlnové délce 555 nm. Lidské oko je nejcitlivější právě na tomto kmitočtu, [19].

### 2.1.4. Intenzita osvětlení E

Intenzita osvětlení je fotometrická veličina, která je definovaná jako světelný tok dopadající na určitou plochu. Je tedy podílem světelného toku (v lumenech) a plochy (v metrech čtverečních). Jednotkou intenzity osvětlení je **lux [ lx ]**. Lux je jednou z vedlejších jednotek soustavy SI. Jedná se o osvětlení způsobené světelným tokem 1 lm dopadajícím na plochu 1 m<sup>2</sup>, [13].

$$E = \frac{\phi}{S} \quad (2)$$

### 2.1.5. Jas L

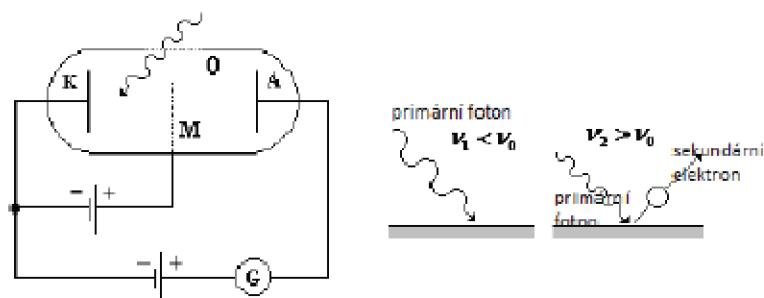
Jas svítící plochy v určitém směru je dán poměrem její svítivosti v uvažovaném směru a průmětu její plochy do roviny kolmé k tomuto směru. Jas je měřítkem pro vjem světlosti svítícího nebo osvětlovaného tělesa, jak jej vnímá lidské oko. Jednotkou je [cd.m<sup>-2</sup>], [19].

### 2.1.6. Fotoelektrický jev

Fotoelektrický jev, jehož schéma je znázorněno na obrázku 1, nastává v případech, kdy se celá energie kvanta fotonového záření předává některému elektronu z elektronového obalu absorbujícího materiálu, případně volného elektronu. Část energie fotonu se spotřebuje na uvolnění elektronu (na tzv. výstupní práci  $W$ ) a zbytek tvoří kinetickou energii vzniklého fotoelektronu. Foton, který způsobil fotoelektrický jev, zaniká a jeho energii získává fotoelektron, který ionizuje své okolí. Elektrická bilance celého jevu je popsána Einsteinovou rovnicí:

$$h \cdot \nu = w + \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 \quad (3)$$

Atom, ze kterého byl vyražen elektron, je ve vybuzeném stavu a přechází do základního stavu emisí elektromagnetického záření o frekvenci odpovídající rozdílu energie vybuzeného a základního stavu.



Obrázek 3: Fotoelektrický jev

Bylo zjištěno, že pro každý kov existuje jistá mezní frekvence  $\nu_0$  (a jí odpovídající mezní vlnová délka  $\lambda_0$ ) taková, že elektrony se uvolňují pouze při frekvenci  $\nu_0$  a frekvencích vyšších (resp. při vlnové délce  $\lambda_0$  a vlnových délkách nižších), přičemž platí  $W = h_0 \cdot \nu_0$ . Na frekvenci použitého elektromagnetického záření závisí také energie vylétávajících elektronů, [8], [15].

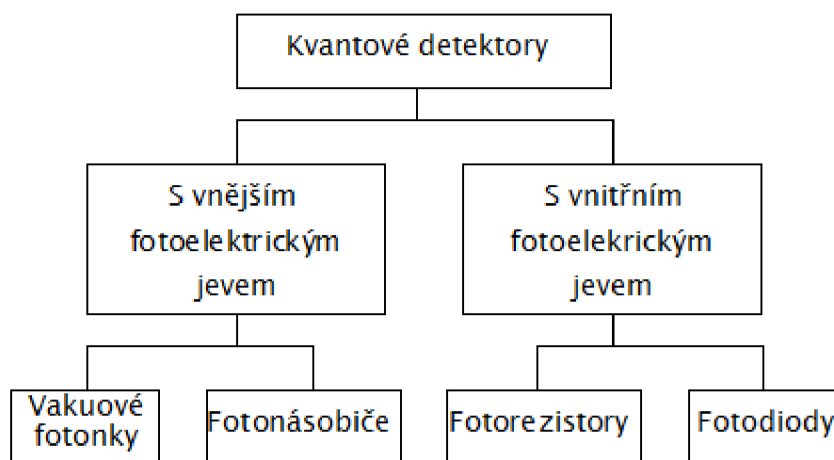
## 2.2. Typy optoelektronických detektorů

Detektorem rozumíme prvek, který převádí energii optického záření na jinou měřitelnou veličinu. Dělení detektorů:

- Tepelné detektory, u kterých dochází vlivem dopadajícího záření k ohřevu a tím ke změně některého teplotně závislého parametru.
- Kvantové detektory, u nichž dochází k přímé interakci mezi hmotou a fotony dopadajícího záření



Tepelné detektory nejsou pro aplikaci luxmetru vhodné (jsou využívány převážně jako normály nebo pro speciální účely), proto se dále budeme zabývat kvantovými detektory.



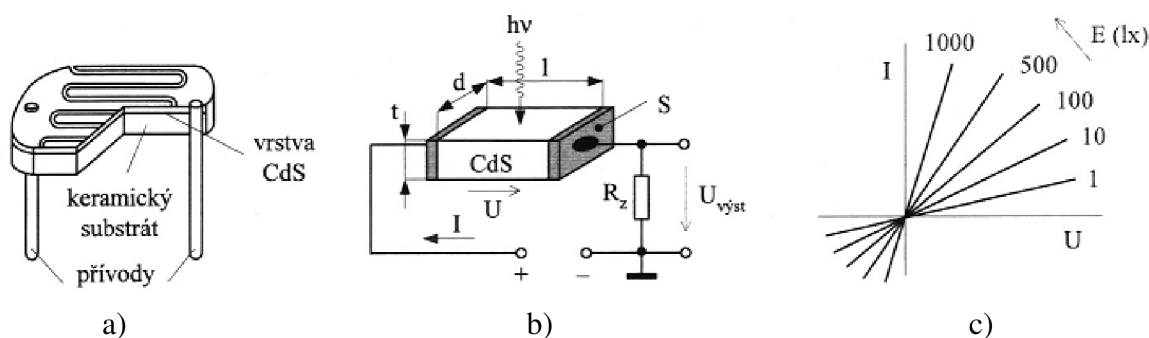
Obrázek 4: Rozdělení kvantových detektorů optického záření

Pro aplikaci luxmetru se dále budeme zabývat pouze kvantovými detektory s vnitřním fotoelektrickým jevem.

### 2.2.1. Fotorezistor

Fotorezistor je polovodičový prvek, jehož vodivost se působením optického záření zvětšuje. Je to velmi citlivý detektor založený na fotovodivostním principu. Lze jej znázornit jako homogenně dotovaný polovodič CdS typu N, opatřeného kontakty a zapojeného v obvodu naznačeném na obrázku 5. Dopadá-li na něj světlo, dochází ke generaci párů elektron – díra, v důsledku čehož odpor polovodiče klesá a tím se mění i úbytek napětí na zátěži  $R_z$ . Příklad voltampérové charakteristiky je na obrázku 5, kde jako parametr je vyneseno osvětlení  $E$ .

Změna elektrické vodivosti způsobená osvětlením vede ke změně proudu protékajícího rezistorem.



Obrázek 5: Fotorezistor [4]: a) reálná struktura fotorezistoru, b) zjednodušená struktura fotorezistoru, c) voltampérová charakteristika

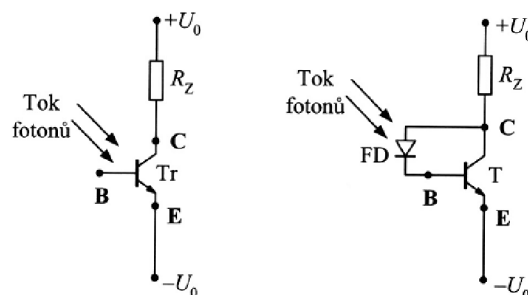
Tloušťka fotorezistorů je obvykle konstantní. Pro dosažení maximální možné citlivosti proto výrobci vytvářejí fotorezistory s co největší délkou  $d$  a nejkratší vzdáleností elektrod  $l$ . Výsledkem je hřebenová struktura obou kontaktů na povrchu vrstvy CdS. Světlo přitom vždy dopadá kolmo na tok proudu a napětí na fotorezistoru má být co největší. Spektrální citlivost CdS fotorezistorů velmi dobře odpovídá citlivosti lidského oka. Má význam například pro konstrukci expozimetrů, automatické řízení úrovně osvětlení apod. Vhodným koncentračním poměrem CdS : CdSe lze spektrální citlivost fotorezistoru měnit. Pro infračervenou oblast se užívá CdTe, InSb apod.

Mezním parametrem fotorezistoru je maximální výkonová ztráta  $P_{\max}$  (desítky mW) a maximální napětí (do 1000V) při  $T = 25^\circ\text{C}$ . Důležitými charakteristickými parametry jsou vlnová délka pro maximální citlivost, hodnota odporu za tmy a při dané hodnotě osvětlení, doba nárůstu a poklesu napětí v obvodu. Nepříjemnými vlastnostmi fotorezistorů je světelný paměťový efekt a závislost teplotního koeficientu odporu na osvětlení. [5]

### 2.2.2. Fototranzistory

Fototranzistor je aktivní polovodičová součástka pracující s řízenými dvojicemi přechodů. Jedná se o obdobu klasického tranzistoru s tím rozdílem, že přechod je ovládán světelným zářením. Dle osvětlení (dotování) se mění napěťové a proudové parametry přechodů. Podle použitého zapojení se dá využít jednotlivých efektů. Ačkoliv je báze nahrazena prostupem pro světlo, může fototranzistor místo dvou vývodů mít i vyvedenou bázi, pomocí které se může řídit citlivost fototranzistoru.

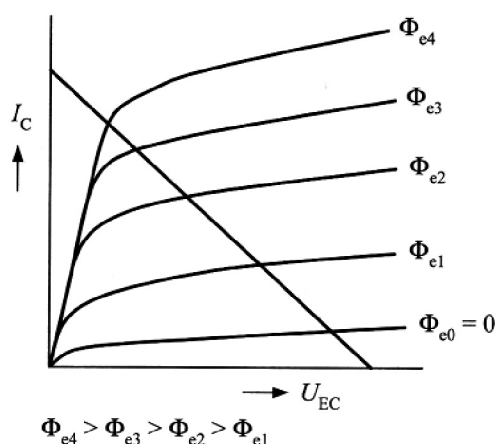
Fototranzistor má zcela analogicky jako obyčejný tranzistor dva PN přechody, z nichž přechod emitor-báze je pólován v propustném směru a přechod báze-kolektor v závěrném směru. Je konstruován tak, že světlo je pohlcováno v oblasti báze, kde vznikají páry nadbytečných nosičů proudu. Světlem vytvořené menšinové nosiče v bázi jsou strhávány polem kolektorového přechodu, přecházejí do kolektoru a tvoří tzv. primární fotoproud  $I_c$ .



Obrázek 6: Náhradní elektrické schéma fototranzistoru, [5].

Fototranzistor se zapojuje se společným emitorem. Kolektorový přechod je polarizován závěrně. U fototranzistoru se tedy používá nejen tranzistorového jevu, charakterizovaného proudovým zesilovacím činitelem  $\beta$ , ale současně i vnitřního fotoelektrického jevu na závěrně polarizovaném kolektorovém přechodu ve funkci fotodiody.

Při dopadu světelného záření na fotodiodu se zvětší její závěrný proud  $I_0$  a tím vzroste proud báze tranzistoru a také celkový proud tranzistorem. Činnost fototranzistoru charakterizuje sít voltampérových charakteristik, kde parametrem je zářivý tok  $\Phi_e$ .

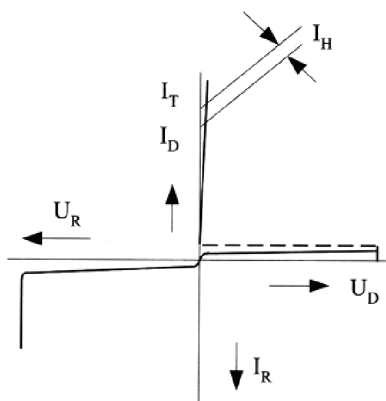


Obrázek 7: Voltampérové charakteristiky fototranzistoru

Fototranzistor se používá i v optočlenech. U fototranzistoru se nepředpokládá přílišné výkonové zatížení, [5].

### 2.2.3. Fototyristor

Jedná se o tyristory, které lze dopadajícím zářením (tokem fotonů) přepnout z blokovacího stavu do propustného. Konstrukčně i funkčně vycházejí všechny fototyristory z diodového fototyristoru (závěrně blokujícího diodového fototyristoru), jehož uspořádání a voltampérová charakteristika je na obrázku 8. Liší se od něho počtem a druhem vrstev křemíku vyvedených na svorky a dosahujícími základními parametry.



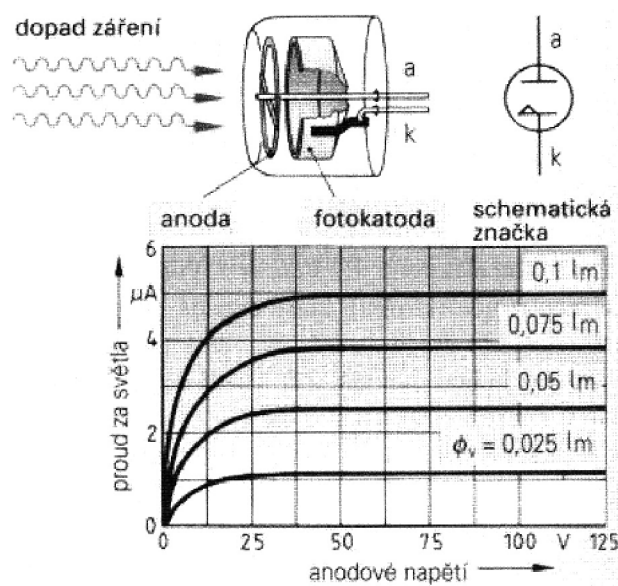
Obrázek 8: Voltampérová charakteristika fototyristoru

Hlavním způsobem zapínání fototyristoru je zapínání světelným signálem. Obvod řídicí elektrody se využívá k přizpůsobení vlastností konkrétních součástí daným provozním podmínkám. Jde zejména o citlivost na dopadající záření. Lze ji v širokých mezích ovlivnit změnou velikosti odporu  $R_{GK}$  zapojovaným mezi elektrodu G a katodu K. Výhodou je, že sepnutí tyristoru trvá i po zániku osvětlení jeho řídicí elektrody světlem. Vypnutí tyristoru ze

zapnutého stavu lze realizovat pouze poklesem napětí na jeho anodě (nebo poklesem protékajícího proudu) pod takzvanou přídržnou hodnotu  $I_H$ . [5]

#### 2.2.4. Vakuové fotonky

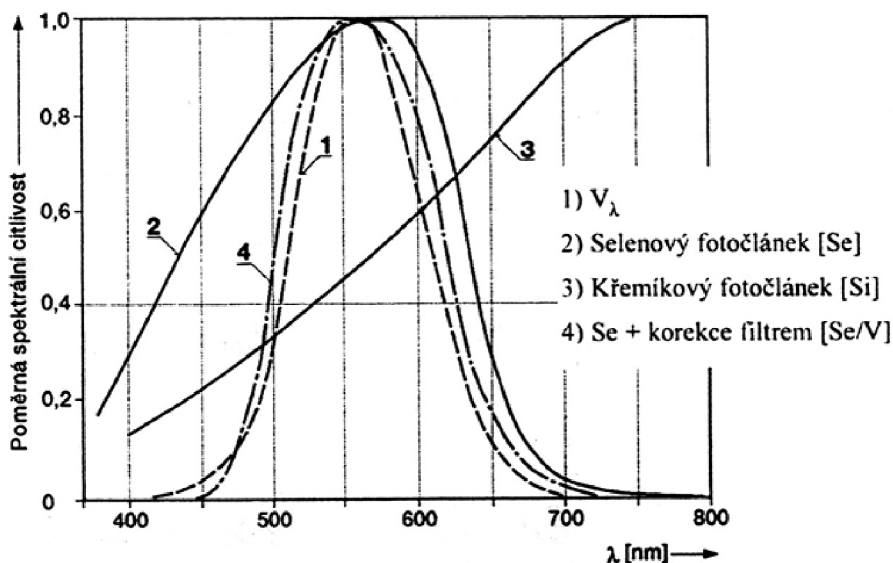
Vakuová fotonka je představována ve vzduchoprázdné skleněné baňce katodou ze slitiny cesia a antimonu (citlivou na modré světlo). Elektrony emitované z katody proudí na anodu. Bez osvětlení prochází fotonkou jen velmi malý proud za tmy. Při osvětlení katody prochází fotonkou proud, jehož velikost závisí především na intenzitě osvětlení. Citlivost těchto vakuových fotonek je přibližně  $50 \mu\text{A}/\text{lm}$ . Vakuové fotonky jsou na rozdíl od polovodičových fotocitlivých součástek citlivé i na ultrafialové záření, [5].



Obrázek 9: Vakuová fotonka a její charakteristika [5]

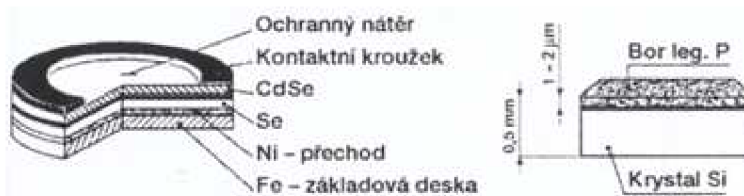
#### 2.2.5. Fotočlánky

Fotočlánek je nejčastěji používané čidlo pro objektivní světelná (popř. radiometrická) měření. Někdy je také označován jako fotodetektor, neboť vždy obsahuje detektor citlivý na světlo. Ten převádí světlo či jinou část elektromagnetického záření na elektrický signál. Fotočlánek bývá součástí fotometrické hlavičky, která obsahuje další doplňkové příslušenství - např. filtry pro korekci spektrální citlivosti, nastavce pro směrové přizpůsobení, konstrukční součásti atd. Je základem mnohých fotometrických přístrojů.



Obrázek 10: Srovnání citlivosti fotočláneků [1]

Polovodičové fotočlánek s velkou fotocitlivou plochou jsou vyráběny převážně z křemíku, ale také ze selenu, sirníku kadmia (CdS) nebo z galiumarsenidu (GaAs). Fotočlánek s kontakty polovodič – kov se skládá např. z plochého polovodiče typu P, na který je napařena tenoučká průhledná vrstva zlata. Přechod se pak vytváří mezi polovodičem a krycí elektrodou. Někdy jsou fotočlánek používány například jako CdS osvitoměry (expozimetry) a při všech řízeních a regulacích světla, které vyžadují snímání a měření osvitů velkých ploch.

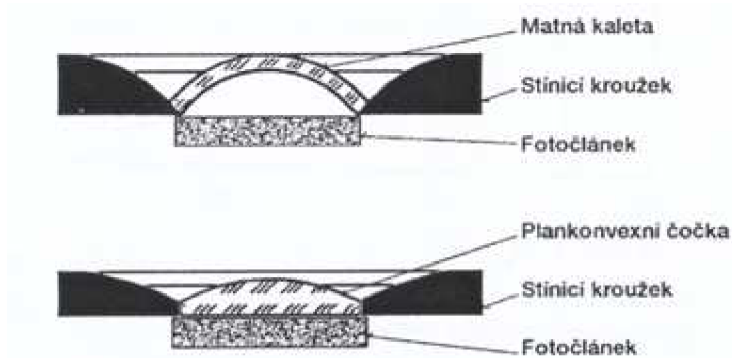


Obrázek 11: Hradlový fotočlánek [1]

Samostatný fotočlánek se však nehodí pro měření osvětlení, poněvadž nerespektuje základní požadavek - nemá spektrální vlastnosti lidského oka. Tato chyba může dosahovat při měření v osvětlovacích soustavách se žárovkami 5 %, ale v osvětlovacích soustavách, kde jsou použity výbojkové světelné zdroje až 50 %. Přístroj, který nemá fotočlánek s odpovídající korekcí na citlivost lidského oka by se neměl pro měření vůbec používat,[1],[5].

### 2.2.6. Kosinový nástavec

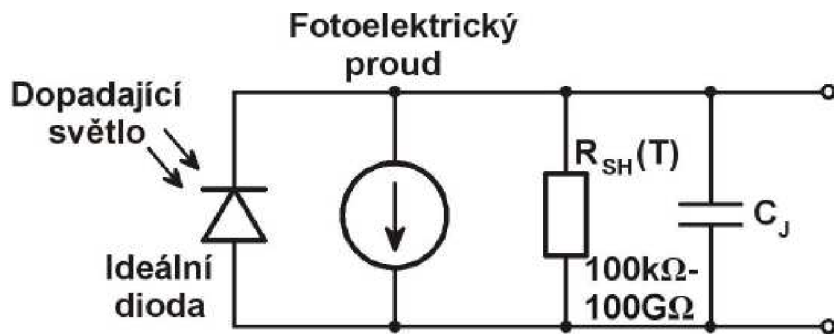
Na obrázku 12 je schematicky znázorněn kosinový nástavec provedený podle Hartig – Helwiega a nástavec podle Reeb – Tosberga. Oba nástavce korigují šikmé dopady světla na povrch fotočlánek. Použije-li se fotočlánek bez tohoto kosinového nástavce, dochází k chybě měření, která se zvětšuje s úhlem dopadu. Celé této problematice byla věnována řada prací, existuje i mezinárodní předpis na to, jaké parametry mají mít jednotlivé typy přístrojů, [1].



Obrázek 12: Základní typy kosinových nástavců [1]

### 2.2.7. Fotodiody

Fotodiody generují signál, který je úměrný intenzitě osvětlení. Náhradní obvod fotodiody je zobrazen na obrázku 13.



Obrázek 13: Náhradní obvod fotodiody [9]

Proud nakrátko je lineární na intenzitě osvětlení a proto se používá pro měření intenzity osvětlení. Napětí naprázdno se v propustném směru mění logaritmicky s úrovní intenzity osvětlení, a proto se pro měřicí účely nepoužívá.

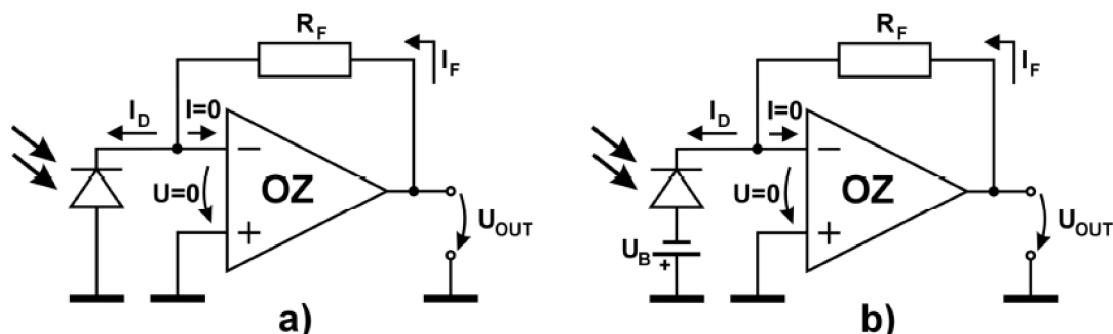
Odporový bočník  $R_{SH}$  je obvykle řádu  $1000\text{ M}\Omega$  (při pokojové teplotě) a snižuje se s faktorem při zvýšení teploty o  $10^\circ\text{C}$ . Kapacita  $C_J$  představuje kapacitní vlastnost  $PN$  přechodu. Tato kapacita ovlivňuje šířku pásma i šumové vlastnosti fotodiody. Kapacitu diody  $C_J$  lze zmenšit závěrným napětím přiloženým na fotodiodu.

Fotodiody mohou být provozovány s nulovým předpětím nebo se závěrným předpětím. Přesnější lineární převod se dosahuje při zapojení fotodiody s nulovým předpětím. Naopak vyšší snímací rychlost se dosahuje připojením závěrného předpětí fotodiody, avšak na úkor linearity, [6].

Při připojení závěrného předpětí teče fotodiodou určité množství proudu  $I_0$  při nulovém osvětlení fotodiody. Tento proud je nazýván *dark current* (tzv. proud za tmy). Pokud je předpětí fotodiody nulové, je nulový i proud za tmy. V režimu nulového předpětí je šum diody tvořen *teplotním šumem*, generovaným odporem  $R_{SH}$ .

V režimu závěrného předpětí je přídavným zdrojem šumu v důsledku vodivosti tzv. výstřelový šum.

Na obrázku 14 jsou zobrazeny pracovní režimy zapojení fotodiody pro snímací účely.



Obrázek 14: Pracovní režimy fotodiody [9]

- a) Režim nulového předpětí
- b) Režim závěrného předpětí

Oba pracovní režimy tvoří převodníky proudu fotodiody na napětí. Invertující vstup operačního zesilovače tvoří virtuální zkrat, do kterého teče nulový proud a který je na potenciálu neinvertujícího vstupu operačního zesilovače. Aby proud tekoucí do invertujícího vstupu byl roven nule, musí být proud diodou (proud úměrný intenzitě osvětlení) roven proudu zpětnovazebního odporu, [6].

$$I_D = I_F \tag{4}$$

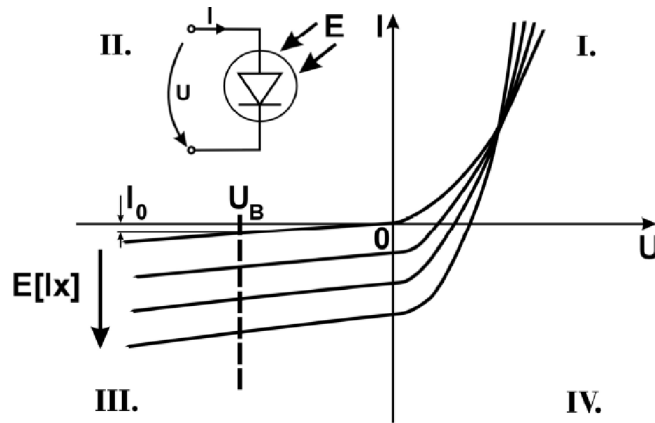
Kde  $I_D$  proud fotodiodou  
 $I_F$  proud zpětnovazebním odporem.

Kladné výstupní napětí převodníku I/V bude úměrné intenzitě osvětlení fotodiody a velikosti zpětnovazebnímu odporu.

Proud zpětnovazebním odporem je dán vztahem:

$$I_F = \frac{U_{OUT}}{R_F} \tag{5}$$

Se vzrůstajícím zpětnovazebním odporem roste výstupní napětí operačního zesilovače. Konstrukční řešení luxmetru vyžaduje možnosti změny citlivosti v závislosti na měřicím rozsahu, [6], [9].



Obrázek 15: Pracovní režimy fotodiody [6]

**Shrnutí vlastností pracovních režimů:**

**a) Režim nulového předpětí**

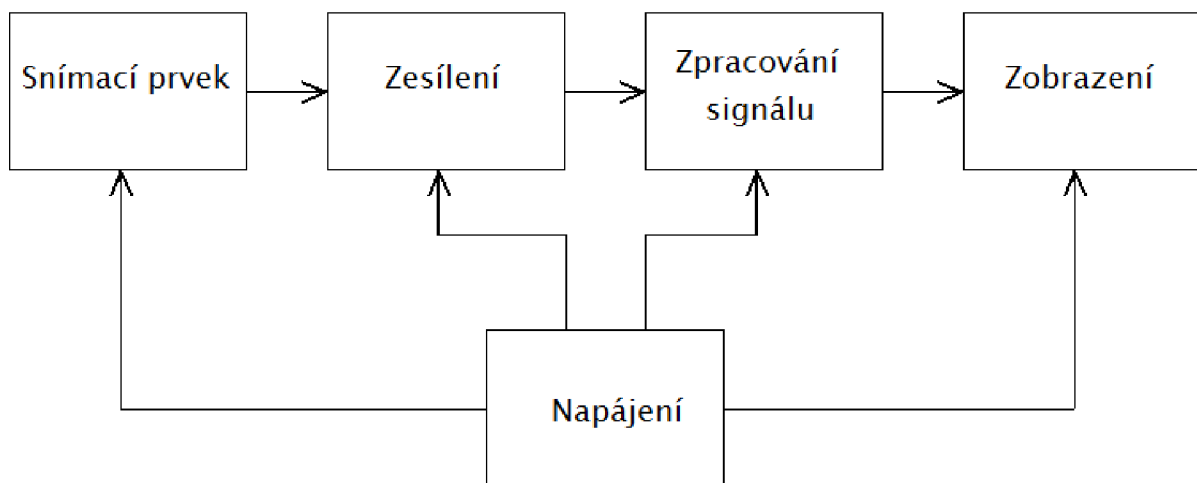
- Nulový proud za tmy
- Lineární závislost
- Nízký šum
- Pro přesné aplikace

**b) Režim závěrného předpětí**

- Obsahuje proud za tmy
- Mírné zhoršení linearity
- Vyšší šum
- Vysokorychlostní aplikace

## 3. Systémový návrh luxmetru

### 3.1. Blokové schéma



Obrázek 16: Blokové schéma luxmetru



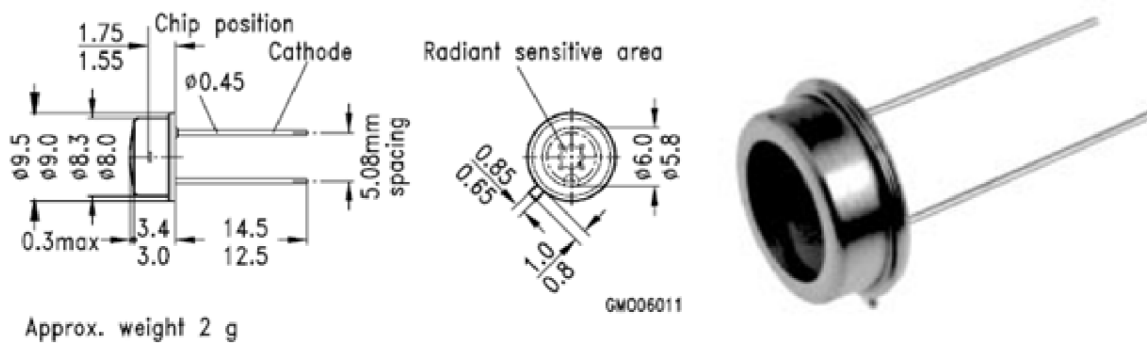
## 3.2. Popis obvodových prvků

### 3.2.1. Snímací prvek

Základem tohoto měřicího přístroje je spektrálně kompenzovaná křemíková fotodioda firmy Siemens vytvořená pro měření intenzity osvětlení v rozsahu vlnových délek 350 nm–820 nm a přizpůsobená citlivosti lidského oka BPW21.

Vlastnosti:

- Hermeticky uzavřené pouzdro
- Skleněné okénko s vestavěným filtrem pro korekci viditelného záření
- Úhel snímání osvětlení  $\pm 50^\circ$
- Vysoká citlivost
- Výborná linearita



Obrázek 17: Fotodioda BPW21 [20]

Tato součástka je přímo určená pro měření osvětlení a má předřazený korekční filtr, který upravuje tvar její charakteristiky tak, aby byla podobná charakteristice spektrální citlivosti lidského oka. Výhodou fotodiody je její, v ideálním případě, lineární závislost výstupního proudu nakrátko na osvětlení. Díky tomu lze snadno měřit osvětlení, např. převodem proudu nakrátko na napětí.

Popis	Symbol	Hodnota	Jednotka
Spektrální citlivost, $V_R = 5V$	S	10 ( $\geq 5,5$ )	nA/lux
Vlnová délka maximální citlivosti	$\lambda_{Smax}$	550	550 nm
Spektrální rozsah citlivosti $S=10\%$ z $S_{max}$	$\lambda$	350 ... 820	nm
Citlivostní plocha zářiče	A	7,34	mm <sup>2</sup>
Rozměr ohniska citlivostní plochy	D x Š	2,73 x 2,73	mm x mm
Vzdálenost od přední stěny pouzdra	H	1,9 ... 2,3	mm
Poloviční úhel	$\varphi$	$\pm 55$	Grad
Proud za tmy $V_R=5V$ $V_R=10mV$	$I_R$ $I_R$	2 ( $\leq 30$ ) 8 ( $\leq 200$ )	nA pA
Spektrální citlivost	$S_\lambda$	0,34	A/W
Výtěžnost, $\lambda=550$ nm	$\eta$	0,80	Foton
Pevný napěťový obvod, $E_V=1000$ luxů	$V_0$	400 ( $\geq 320$ )	mV
Zkratový proud	$I_{sc}$	10	uA
Doby náběžných sestupných hran $R_L=1k\Omega$ , $V_R=5V$ , $\lambda=550$ nm, $I_p=10\mu A$	$t_r, t_f$	1,5	us
Napětí v propustném směru $I_F=100$ mA, $E=0$	$V_F$	1,2	V
Kapacita	$C_0$	580	pF
Teplotní koeficient z $V_0$	$TC_V$	-2,6	mV/K
Teplotní koeficient z $I_{sc}$	$TC_I$	- 0,05	%/K
Ekvivalentní výkon šumu $V_R=5V$ , $\lambda=550$ nm	NEP	$7,2 \cdot 10^{-14}$	$W \cdot Hz^{-1/2}$
Detekční limit	D	$1 \cdot 10^{12}$	cm. $Hz^{1/2} \cdot W^{-1}$

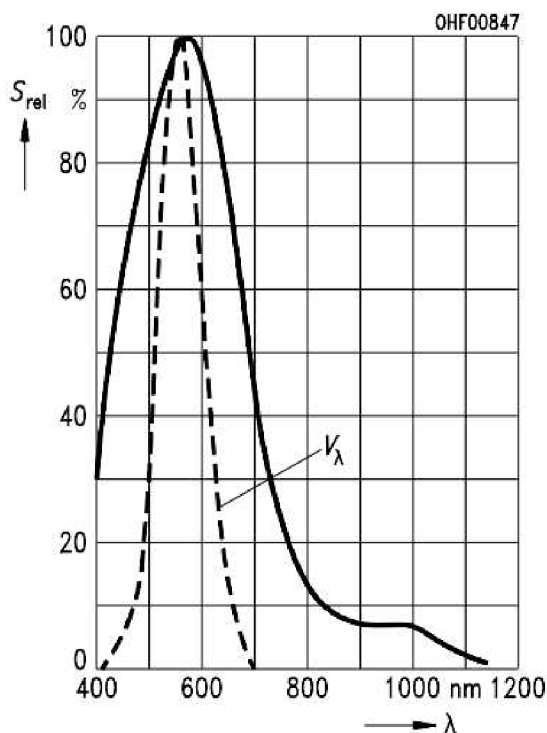
Tabulka 1: Charakteristika fotodiody BPW21, [20].

Popis	Symbol	Hodnota	Jednotka
Pracovní a skladovací teplotní rozsah	$T_{op} T_{stg}$	-40 ... +80	°C
Teplotní pájení pro vzdálenost 2mm od spoje	$T_s$	235	°C
Závěrné napětí	$V_R$	10	V
Celková výkonová spotřeba	$P_{tot}$	250	mV

Tabulka 2: Maximální rozsah fotodiody BPW21, [20].

### Relative spectral sensitivity

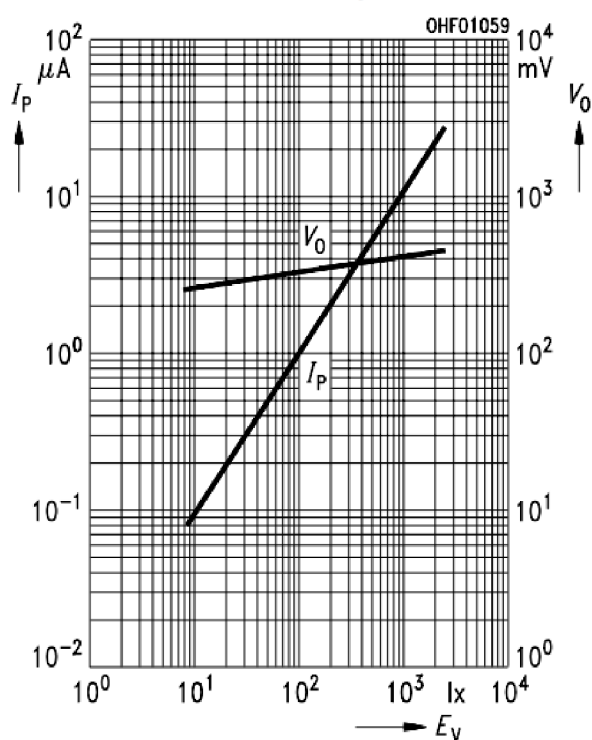
$$S_{\text{rel}} = f(\lambda)$$



Obrázek 18: Spektrální závislost fotodiody BPW21, [20].

### Photocurrent $I_P = f(E_V)$ , $V_R = 5\text{ V}$

### Open-circuit voltage $V_O = f(E_V)$



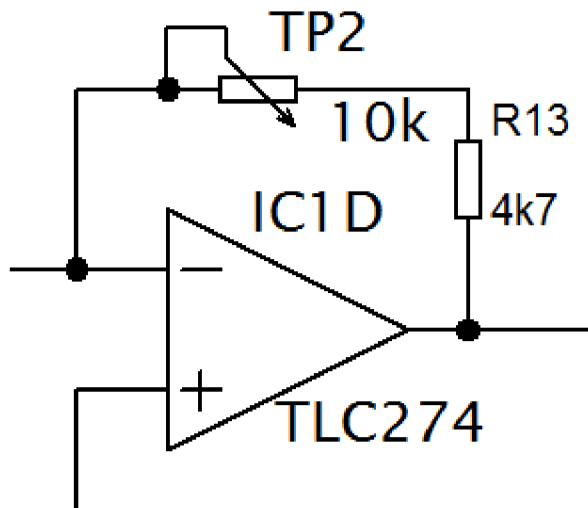
Obrázek 19: Závislost výstupního proudu a napětí na intenzitě osvětlení, [20].

### 3.2.2. Napěťový zesilovač

**Operační zesilovače (OZ)** se dříve používaly převážně v analogových počítačích, kde sloužily pro základní aritmetické operace sčítání, odčítání, násobení, dělení a rovněž pro integraci analogových signálů. Dnes se používají v řadě elektronických obvodů, jako jsou například stejnosměrné i střídavé zesilovače, komparátory, klopné obvody, aktivní filtry, převodníky z analogového signálu na digitální a naopak. Vyrábí se jako integrované obvody. Stávají se základním obvodovým prvkem. Operační zesilovač je v podstatě širokopásmový zesilovač se stejnosměrným vstupem. Ideální operační zesilovač má napěťové zesílení nekonečně velké, vstupní odpor nekonečně velký a výstupní odpor nulový. Skutečný operační zesilovač se k těmto hodnotám pouze přibližuje. Jeho maximální napěťové zesílení je  $10^5$ , vstupní odpor je  $10^4$  až  $10^5 \Omega$  a výstupní odpor je větší než  $100\Omega$ .

Operační zesilovač má dva vstupní obvody: invertující (-) a neinvertující (+). Při zavedení signálu na invertující vstup se na výstupu operačního zesilovače objeví signál v opačné fázi, zatímco při přivedení signálu na neinvertující vstup je signál na vstupu a na výstupu operačního zesilovače ve fázi. Operační zesilovač pracuje téměř výhradně se zpětnou vazbou, vedenou z výstupu zpět na vstup. Je to obvykle zpětná vazba záporná a zmenšuje zesílení. O celkovém zesílení pak nerozhoduje vlastní operační zesilovač, nýbrž nastavení

prvků zpětné vazby. Aby toto tvrzení platilo beze zbytku, musel by mít operační zesilovač nekonečně velké zesílení (ideální OZ). V běžných zapojeních využijeme zesílení např. stokrát, tisíckrát a výše. Snadno se nastaví pomocí zpětné vazby a správnou volbou rezistorů. Požaduje se, aby zesílení bylo nezávislé na zatížení výstupu zesilovače, [6].



Obrázek 20: Příklad schematické značky operačního zesilovače TLC274 se zavedenou zpětnou vazbou

### Vlastní návrh:

Jako OZ je zvolen TLC274, typu LinCMOS, který dokáže správně pracovat již při nízkých napájecích napětích. Tento typ představuje čtyřnásobný operační zesilovač s širokou možností použití a s nízkým napájecím napětím. Výhodou těchto zesilovačů je vysoká vstupní impedance, [12].

### 3.2.3. Převodník A/D

Analogově digitální převodník je elektronická součástka určená pro převod spojitého (neboli analogového) signálu na signál diskrétní (digitální). Důvodem tohoto převodu je umožnění zpracování původně analogového signálu na číslicový. V digitální podobě se také dají signály daleko kvalitněji zaznamenávat a přenášet, [14].

*Komparační převodníky* ADC jsou založeny na principu porovnávání vstupní spojitě veličiny s kvantovanou referenční veličinou.

Podle toho, zda se porovnání uskutečňuje současně se všemi možnými úrovněmi referenční veličiny anebo postupně v čase, rozeznáváme *paralelní* a *postupné komparační A/Č převodníky*.

Čas převodu, který je daný zpožděním komparátorů a zpožděním logického obvodu je v porovnání s jinými metodami převodu velmi krátký (stovky, výjimečně desítky nanosekund). Nevýhodou zapojení je potřeba velkého počtu komparátorů a nutnost přesného nastavení jednotlivých referenčních napětí. Tento typ převodníku se používá v případech, kde se vyžaduje velmi krátká doba převodu.

*Kompenzační převodníky* ADC pracují na principu kompenzace měřeného napětí výstupním napětím řízeného převodníku DAC. Velikost kompenzačního napětí se mění tak dlouho, až rozdíl mezi velikostí kompenzovaného napětí je menší než chyba kvantování.

Doba jejich převodu je v mikrosekundách. Z hlediska způsobu generace kompenzačního napětí lze rozlišovat ještě kompenzační převodníky s přírůstkou kompenzačního napětí shodné a odstupňované velikosti. Kompenzační převodníky s postupnou aproximací jsou dostatečně rychlé a poměrně přesné.

*Integrační převodníky* ADC využívají řízené integrace měřeného a referenčního napětí, umožňující dosáhnout vysoké přesnosti převodu. Při dalším zpracování signálu se využívá buď převodu na časový interval, nebo na frekvenci impulzů. Navíc mají filtrační účinek pro superponovaná střídavá rušivá napětí. Nevýhodou je poměrně dlouhá doba převodu.

*Přímé převodníky* ADC převádějí vstupní analogové napětí přímo na výstupní slovo.

U *nepřímých převodníků* ADC je vstupní analogové napětí převedeno nejprve na jinou analogovou veličinu (např. čas, kmitočet) a teprve potom je tato pomocná analogová veličina převedena do číslicového tvaru, [6].

Zvolené panelové měřidlo obsahuje integrovaný analogově digitální převodník vhodný pro zapojení luxmetru.

#### 3.2.4. Zobrazení

Displej z tekutých krystalů, zkratkou LCD, je tenké a ploché zobrazovací zařízení skládající se z omezeného počtu barevných nebo monochromatických pixelů seřazených před zdrojem světla nebo reflektorem. Vyžaduje poměrně malé množství elektrické energie, je proto vhodné pro použití v přístrojích běžících na baterie.

Každý pixel LCD se skládá z molekul tekutých krystalů uložených mezi dvěma průhlednými elektrodami a mezi dvěma polarizačními filtry, přičemž osy polarizace jsou na sebe kolmé. Bez krystalů mezi filtry by bylo světlo procházející jedním filtrem blokováno filtrem druhým. Molekuly tekutých krystalů jsou bez vnějšího elektrického pole ve zkrouceném stavu. Elektrické pole způsobí, že se molekuly srovnají s mikroskopickými drážkami na elektrodách. Drážky na elektrodách jsou vzájemně kolmé, takže molekuly srovnané do spirálové struktury otáčí polarizaci procházejícího světla o 90 stupňů, což mu umožňuje projít i druhým filtrem. Polovina světla je absorbována prvním polarizačním filtrem, kromě toho je ale celá sestava průhledná, [11].

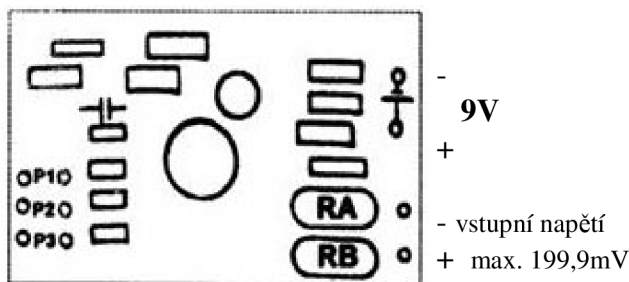
Pro bateriově napájený luxmetr je vhodné použít panelové měřidlo, které je na obrázku 22. Toto měřidlo má napájecí napětí 6 – 9VDC/1mA. Modul 3 ½ místného panelového měřidla s velikostí číslovek 13 mm, určený pro dodatečnou montáž do různých zařízení. Základní citlivost měřidla je 199,9 mV, s přesností  $\pm 0,5 \%$ . Je zvolený první rozsah napětí, tedy do 200mV.

## Parametry panelového měřidla

Panelové 3 ½ místné měřidlo G850M

### Technické údaje:

Vstupní citlivost 200 mV  
 Napájení stejnosměrným napětím 9 V  
 Velikost číslic LCD 13 mm  
 Automatická indikace polarity  
 Zaručený nulový údaj na displeji při nulovém napětí na vstupu  
 Vysoký vstupní odpor (> 100 MΩ)



Obrázek 21: Pájecí body

### Popis:

Základní rozsah:	199,9 mV
Maximální zobrazitelná hodnota:	číslo 1999 s automatickou indikací polarity
Způsob zobrazení:	LCD displej
Měřicí metoda:	Dual-Slope integrační A/D převodník
Indikace přeplněného rozsahu:	zobrazení symbolu 1
Počet měření:	2-3x za sekundu
Vstupní otvor:	>100M Ω
Přesnost:	±0,5% (23°C ±5°C, 80% PH)
Desetinná tečka:	nastavitelná propojkou na desce plošného spoje
Napájecí napětí:	stejnoseměrné 9 V
Proudový odběr:	1 mA
Rozměry:	68 x 44 mm

### Rozteč otvoru pro uchycení:

54,5 x 38 mm obdélníkový

### Uvedení do provozu:

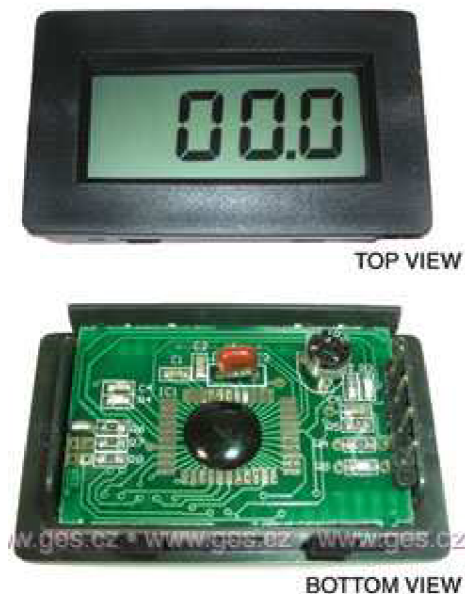
Pomocí děliče napětí lze změnit vstupní citlivost přístroje. Hodnoty rezistorů jsou uvedeny v následující tabulce:

Maximální měřené napětí	Hodnoty rezistorů RA a RB	Desetinná tečka
200 mV		Propojte pájecí body P1
20 V	Odstraňte propojku na pozici RB a nahraďte ji rezistorem 9,9 MΩ. Do pozice RA zapojte rezistor 100 kΩ.	Propojte pájecí body P2
200 V	Odstraňte propojku na pozici RB a nahraďte ji rezistorem 9,99 MΩ. Do pozice RA zapojte rezistor 10 kΩ.	Propojte pájecí body P1
500 V	Odstraňte propojku na pozici RB a nahraďte ji rezistorem 9,999MΩ. Do pozice RA zapojte rezistor 1 kΩ.	

Tabulka 3: Přepínání rozsahů

- Odporů RA a RB - metalizované rezistory ½ W s přesností alespoň 0,5 %.
- Rezistory nejsou součástí přístroje.
- Napájecí napětí 9 V.
- Při použití jiného než 200 mV rozsahu doporučujeme přístroj kalibrovat. Kalibrace se provádí známým napětím s úrovní rovnající se nejlépe polovině maximálního rozsahu. Např. pro rozsah 200 V hodnotou 100 V. Trimrem R2 nastavte správnou hodnotu na displeji.

- Měřené napětí se připojuje mezi svorky Vin a GND. Napětí by mělo být pouze stejnosměrné.



Obrázek 22: Panelové měřidlo [16]

### 3.2.5. Napájení

Stabilní a vyhlazené napájení je základem spolehlivé funkce každého elektronického zařízení, v případě měřicího přístroje to platí dvojnásob. Různých možností napájení je nepřehledné množství, já zde rozeberu pouze variantu, která je použitelná pro můj projekt.

Baterie a akumulátory jsou prakticky jedinou volbou pro napájení přenosových přístrojů. Podle vlastností elektrochemických reakcí se dělí na primární (např. suché články) a sekundární (akumulátory).

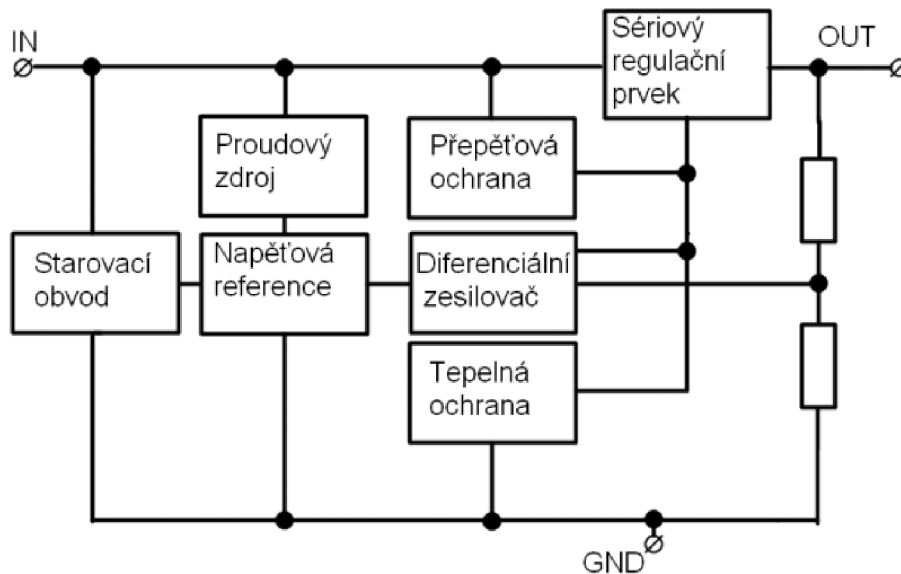
Akumulátory jsou vhodnější pro zařízení, jejichž spotřeba by při použití primárních článků znamenala nutnost jejich časté výměny. Navrhované zařízení však do této kategorie nespadá, neboť zařízení je navrhováno s cílem nízké spotřeby energie.

### 3.2.6. Sériový stabilizátor napětí

V elektronických obvodech jsou často používány takzvané třibodové stabilizátory napětí. Jsou to velmi praktické obvody vyráběné již dlouhou dobu mnoha výrobci. Jsou označovány skupinou znaků s významem lineární obvod doplněnou čtyřmi číslicemi 78XX, kde XX označuje jmenovitou hodnotu výstupního napětí.

Lineární třibodové stabilizátory jsou v principu sériovými stabilizátory. To znamená, že do série se zátěží je zapojen výkonový regulační prvek, jehož odpor je řízen odchylkou výstupního napětí od napětí na referenčním obvodu. Vývod "IN" je společným přívodem sériového regulačního prvku a napájení regulačního obvodu. Vývod "OUT" je výstupem

sériového regulačního prvku a vstupem regulačního obvodu pro napětí na výstupu. Vývod "GND" je vstupem pro připojení na uzel se vztažnou hodnotou napětí.



Obrázek 23: Blokové schéma tříbodového sériového stabilizátoru [17]

Z tohoto blokového schématu je zřejmé, že ke správné činnosti musí mít regulační výkonový prvek k dispozici rozdíl potenciálu na vstupu a na výstupu. Rozhodující část výkonu, který se v něm tráví a který musí být odváděn z obvodu v podobě tepla, je dána součinem tohoto rozdílu potenciálů a výstupního proudu. Pro součástky řady 78XX je většinou tento rozdíl potenciálů požadován minimálně 2V, [17].

## 4. Obvodové řešení

Možnosti konstrukčního řešení luxmetru vycházejí z určení typu optického snímače, od kterého se odvíjí konstrukční návrh optické sondy.

Vlastnosti optického snímače:

- lineární závislost parametrů optického snímače v závislosti na dopadající intenzitě osvětlení
- dostatečná přesnost vyhovující pro konstrukci luxmetru
- minimální nežádoucí vlivy ovlivňující přesnost naměřených hodnot (teplota, vlhkost, hystereze, ...)
- minimální požadovaná setrvačnost

Po stanovení optického snímače splňujícího zmíněné požadavky je nutné navrhnout koncepci převodníku využívajícího vlastností optického snímače k převodu na analogovou



veličinu. Stanovit možnosti změny citlivosti tohoto převodníku v závislosti na měřícím rozsahu.

#### 4.1. Použitý detektor

Jako optický snímač intenzity osvětlení je použita fotodiody BPW 21, jejíž spektrální citlivost je vytvořena pro rozsah viditelného záření. Parametry fotodiody jsou uvedeny v předchozí kapitole, viz Tabulka 1. Je použit fotovodivostní režim s nulovým předpětím fotodiody, jehož výhodou je odstranění nežádoucího proudu za tmy a maximální převodní linearita. Pro tento převodník je použit operační zesilovač TLC274.



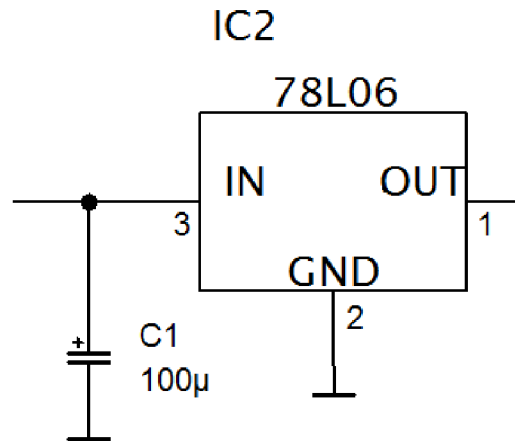
Obrázek 24: Výroba sondy

Na obrázku 24 je vidět návrh na výrobu sondy. Fotodiody je umístěna v krabičce od filmu. Do krabičky je ještě umístěna kovová matka většího průměru jako závaží, pro pohodlnější manipulaci (například při umístění na stůl ji kabel nestrhává). Upevnění součástí je provedeno tavnou pistolí. Od kontaktů fotodiody je vyveden stíněný vodič, který je zakončen konektorem JACK 3,5 mm, aby byla od měřícího přístroje v případě potřeby odnímatelná. Opředení vodiče (stínění) musí být spojeno se zemí, proto je připojena fotodiody k této části vodiče anodou. Vodič by neměl být příliš dlouhý. Spíše než jeho odpor by se negativně mohlo projevit překmitý rušení a to především na rozsahu 200 lx, kdy je vstup citlivý až na setiny  $\mu\text{A}$ , [18].

#### 4.2. Popis schématu zapojení

Základní aplikační zapojení monolitického stabilizátoru 78L06 je na obrázku 25. Kondenzátor C1 brání rozkmitání stabilizátoru. Jeho hodnota není kritická, vhodným provedením jsou keramické nebo elektrolytické kondenzátory. Pro správnou činnost je nutné, aby byly připojeny co nejkratšími přívody k vývodům vlastního stabilizátoru. V tomto základním zapojení stabilizátor dodává výstupní napětí jmenovité hodnoty. Maximální proud

je určen jmenovitou hodnotou dovoleného výstupního proudu stabilizátoru a oteplením vlivem výkonu tráveného ve stabilizátoru.



Obrázek 25: Příklad zapojení monolitického stabilizátoru 78L06

Obvod IC1A je zapojen jako komparátor dvou napětí, obrázek 26. Slouží jako indikátor poklesu napětí baterie. Tento operační zesilovač (TLC274) porovnává napětí na zenerově diodě, tedy cca 3 V s napětím na odporovém děliči R3. Pokud klesne napětí baterie pod mez nastavenou odporem, tak bude na záporném vstupu operačního zesilovače menší napětí než na kladném, což má za následek, že na výstupu bude kladné napětí a rozsvítí se červená LED dioda. Od tohoto okamžiku již měření přístrojem nemusí probíhat správně.

Z obrázku 26 je zřejmé, že obvod IC1B je zapojen jako sledovač napětí z odporového děliče R5 a R6. Tyto odpory tvoří dělič napětí 1:2. Na výstupu IC1B je tedy také poloviční napájecí napětí. Toto napětí funguje jako virtuální zem pro vlastní měřicí obvod.

Za fotodiodou následuje převodník proudu na napětí, viz obrázek 26. Je realizován operačním zesilovačem TLC274 a ve schématu označen IC1C. Ten zajišťuje podmínku velmi malého vstupního odporu, který je požadován pro téměř lineární závislost proudu na osvětlení. Jeho zesílení je řízeno zpětnovazebními rezistory, které mění rozsah měřicího přístroje. Společně se zpětnovazebními rezistory je zapojen kondenzátor, který stabilizuje činnost operačního zesilovače, zabraňuje vlastním zákmitům a také filtruje vysoké frekvence, které by fotodioda mohla zachytit.

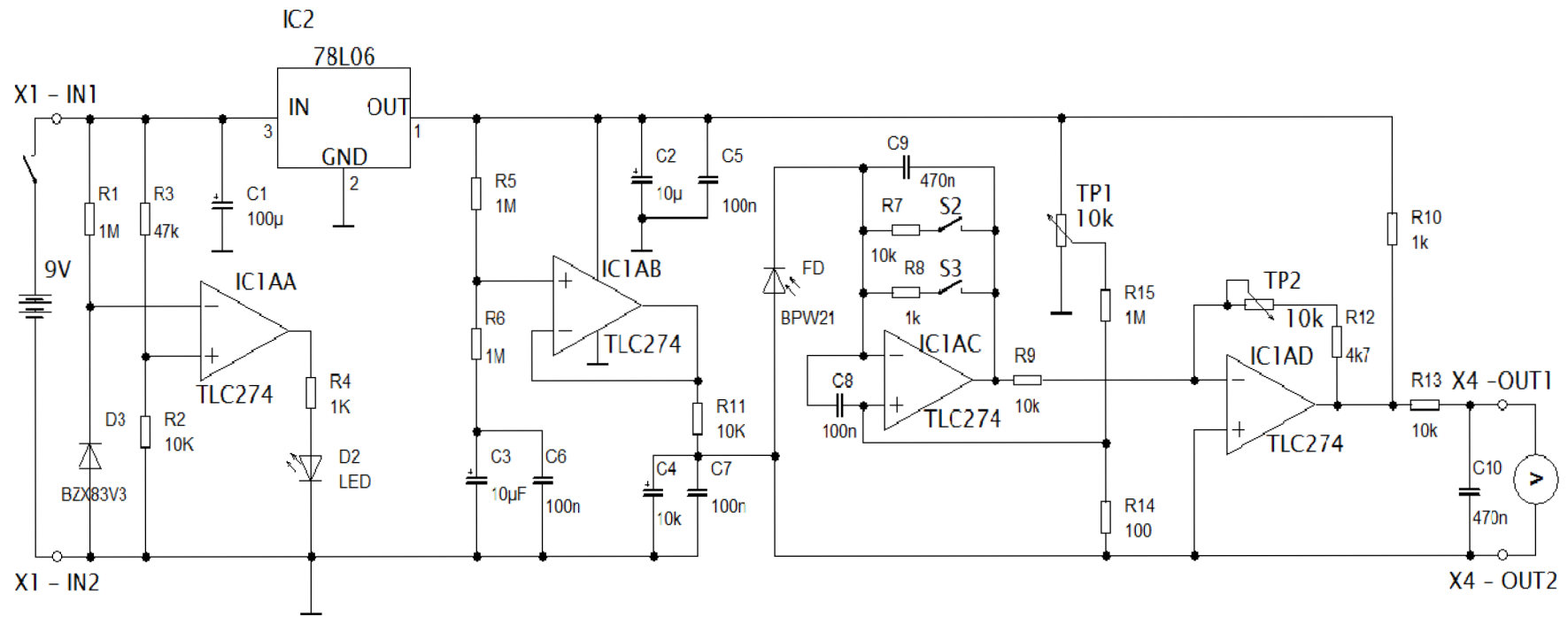
Signál je pak zesílen zesilovačem s nastavitelným zesílením. To je realizováno obvodem IC1D. Ten je zapojen jako invertující zesilovač, má zapojen ve zpětné vazbě trimr TP2, kterým se luxmetr nastavuje. Na výstup je ještě jednoduchý filtr typu dolní propust. Ten odstraní nestabilitu údaje na displeji v případně rychlých výkyvů.

Napájecí obvody musí zajistit potřebné napětí dostatečného výkonu pro celé zařízení. V navrhovaném zapojení se vyskytují obvody, které vyžadují symetrické napájení (operační zesilovače). Základem tedy bude napájecí obvod, který na svém výstupu bude mít symetrické napětí. Zapojení je navrženo pro napětí 9 V. Dále je potřeba vyhovět pravidlům

elektromagnetické kompatibility, což se nejlépe zařídí bateriovým zdrojem, který umožní i snadnou přenositelnost zařízení nezávislou na vnějších zdrojích a dostatečným stíněním celého zařízení, případně jednotlivých obvodů.

Napájecí napětí je odebíráno z 9 V alkalické baterie Panasonic ALK9V, s kapacitou 625 mAh, která je vhodná do přístrojů s vysokým odběrem. Baterie je připojena konektorem AB9V. Díky tomuto konektoru by nemělo dojít k přepólování. Celý obvod by měl mít odběr kolem 6 mA. Záleží na vhodném použití integrovaných obvodů a na zobrazovací části, přičemž všechny součástky nepřesáhnou kapacitu 9 V baterie. Měřič osvětlení by měl být schopen pracovat více než jednu hodinu.

Obrázek 26: Celkové schéma zapojení



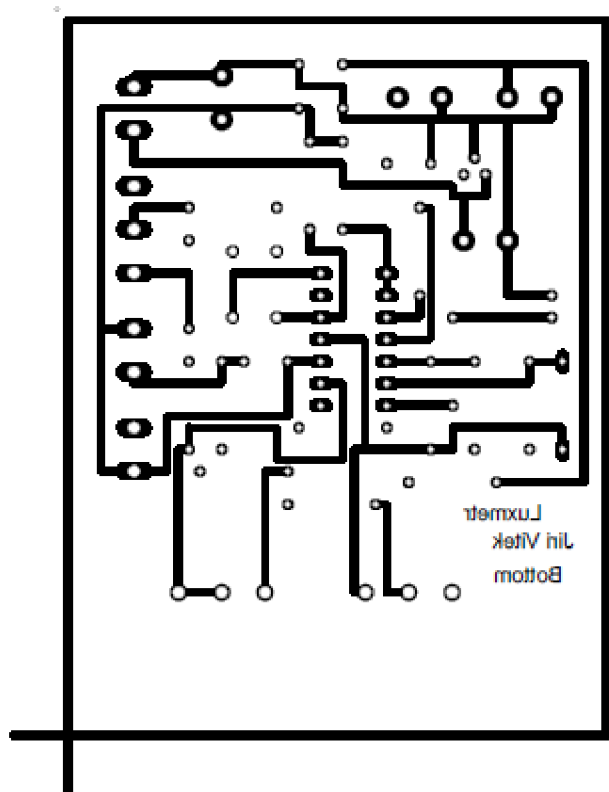
#### 4.5. Výkres plošných spojů

Pro návrh DPS a kreslení schémat je možno využít několik programů. Mezi profesionální programy patří například OrCad, PCB Expedition nebo EAGLE.

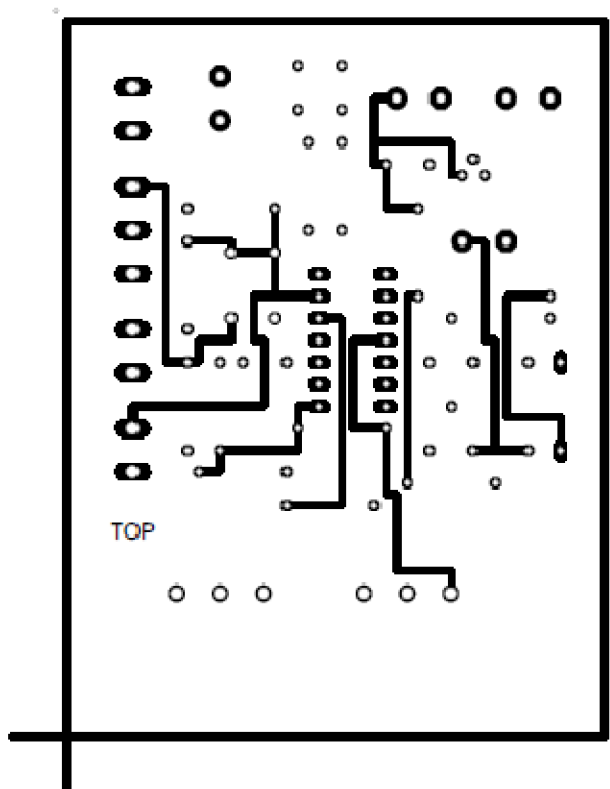
Při navrhování DPS je využito programu EAGLE. Pracovní postup spočívá v překreslení kompletního schématu zapojení, doplněné o všechny potřebné prvky a v samotném návrhu cest DPS. Při návrhu plošného spoje je nutné dbát na následující věci:

- Rozmístění součástek a spojů aby nedošlo k vzájemnému ovlivňování
- Rozmístění prvků z hlediska mechanické konstrukce

Při rozmístění součástek a spojů je možné držet se doporučením výrobců integrovaných obvodů. Plošný spoj byl navržen jako oboustranný při minimalizaci rozměrů a dodržení co nejkratších signálových cest. DPS navrhovaného luxmetru má rozměry 89 x 72 mm.



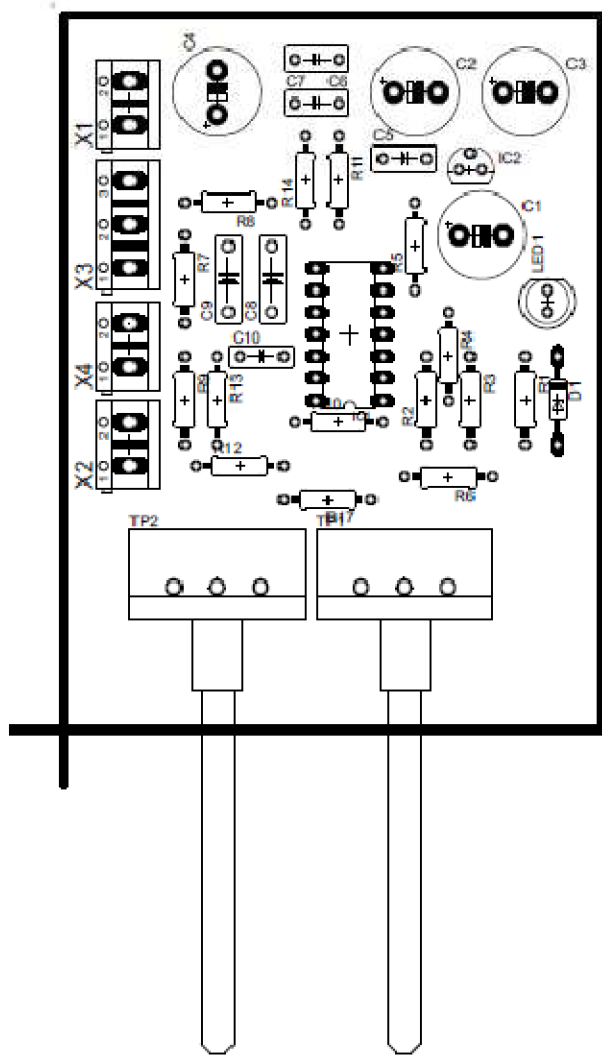
Obrázek 27: Spodní strana desky (vrstva Bottom)



Obrázek 28: Vrchní strana desky (vrstva Top)

Při výtisku je nutné stranu TOP zrcadlit, aby byla deska plošných spojů funkční. Při osazování plošného spoje je vhodné začít osazením čtyřnásobného operačního zesilovače TLC274. Jsou použity standardní součástky, nejedná se o technologii SMT. Osazování se provádí z vrchní strany, tedy ze strany TOP.

Konektor X1 slouží pro připojení napájecího napětí z baterie. Toto napětí je připojeno přes spínač, kterým zapneme celý přístroj. Konektor X2 je pro připojení snímacího prvku, konektor X3 je pro připojení přepínače rozsahů a na X4 je připojen displej. Viz schéma zapojení (obrázek 26).



Obrázek 29: Osazení součástek

Osazovací plány slouží pro orientaci na DPS a ke správnému rozmístění součástek při pájení. V programu EAGLE je vygenerován osazovací plán pro jednu stranu (strana součástek TOP).

Při návrhu DPS je vždy cílem získat předlohy pro výrobu vlastní desky. Nejčastěji se využívá fotolitografická metoda výroby a to buď s pozitivním nebo s negativním fotorezistem. Dále je potřeba vytvořit osazovací plány a seznam součástek.

V praxi záleží na technologii výroby. Podle ní se volí i typ předlohy. Při technologii s pozitivním fotorezistem se odleptají všechna světlá místa a naopak u technologie s negativním všechna tmavá. Předlohy se tisknou na pauzovací papír nebo fólii a ty se pak prosvětlují na desku s nanesenou světlocitlivou vrstvou (fotorezistem), [10].

#### 4.6. Soupiska součástek

Při návrhu se musí počítat nejen s hodnotami součástek, ale i s typem jejich pouzdra a pro ně pak vytvořit správné pájecí plochy a otvory na DPS. Součástky především vývodové součástky jsou voleny dle základních nejpoužívanějších rozměrů.

Název	Hodnota, označení	Pouzdro	Popis
C1	100 $\mu$ F/10V	E2,5-5	Elektrolyt. radiální
C2	10 $\mu$ F/16V	E2,5-5	Elektrolyt. radiální
C3	10 $\mu$ F/16V	E2,5-5	Elektrolyt. radiální
C4	100 $\mu$ F/10V	E2,5-5	Elektrolyt. radiální
C5	100nF	C050-025X075	Keramický
C6	100nF	C050-025X075	Keramický
C7	100nF	C050-025X075	Keramický
C8	100nF	C050-025X075	Keramický
C9	470nF	C050-025X075	Keramický
C10	470nF	C050-025X075	Keramický
C11	1 $\mu$ F/16V	E2,5-5	Elektrolyt. radiální
D1	BZX83V003.0	DO35	Zener. dioda 0,5W
LED	LED5MM	LED5MM	Červená
IC1	TLC274	DIL14	4xOZ CMOS Low Power
IC2	78L06	TO92	Stabilizátor
FD	BPW21	TO - 5	$\lambda = 350-820$ nm
TP1	10k	PC162N	Potenciometr; 0,5W;LIN
TP2	10k	PC162N	Potenciometr; 0,5W;LIN
R1	10k	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R2	47k	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R3	10k	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R4	1k	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R5	1M	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R6	1M	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R7	1k	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R8	10k	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R9	10k	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R10	1k	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R11	100	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R12	4k7	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R13	10k	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R14	100	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
R15	1M	RM 0207	kov. vr. 1% TK50; 0,5W
Panelové měřidlo	G850 M		3-1/2 digit.; $U_{cc} = 6-9V$
Baterie	9V		Alkaline
Krabička	U-KPZ 01 A		Přístroj
Krabička			Detektor
K1	AB9V		
Přepínač	P-B070B		Páčkový mini
Vypínač	1pol. 250/1A		Kolébkový OFF-ON
JACK-vidlice 3,5 mm	K302F MONO		3,5 mm; mono, zlacená
JACK-zásuvka 3,5 mm	SJC-0351-2		3,5 mm; panel.; mono
X1	ARK500/2EX		5mm 2x +zámek
X2	ARK500/2EX		5mm 2x +zámek



X3	ARK500/3EX	5mm 3x +zámek
X4	ARK500/2EX	5mm 2x +zámek
Kabel	RGC54	Koax. 50R

Tabulka 4: Seznam součástí

## 5. Dosažené výsledky, zhodnocení

Při měření osvětlení ve vnitřních prostorech se jako základní veličina charakterizující podmínky vidění a zrakové pohody měří úroveň osvětlení ve vybraných měřicích bodech, vyjádřená u denního osvětlení a denní složky sdruženého osvětlení činitelem denní osvětlenosti D (%) a u umělého osvětlení hodnotami osvětlenosti E (lx).

Přesnost	Typ měření	Celková přípustná chyba v %	Třída
		Luxmetry	
L	Laboratorní	± 3	1
A	Přesné	± 5	2
B	Provozní	± 10	3
C	Orientační	± 20	4

Tabulka 5: Přípustné chyby luxmetrů pro jednotlivé typy měření, [1].

Osvětlenost se měří v měřicích bodech rozmístěných v pravidelné síti v celém prostoru, nebo v jeho funkčně vymezených částech na vodorovné srovnávací rovině o výšce 0,85 m nad podlahou.

Při měření umělého osvětlení je nutné vyloučit vliv denního osvětlení. Proto se měří v noci nebo při zatemnění. Osvětlenost se vzhledem ke stálosti osvětlení vyhodnocuje pouze hodnotami osvětlenosti v luxech. Celkové osvětlení v prostoru nebo jeho funkčně vymezené části se mění v síti pravidelně rozložených bodů. Tedy volba měřicích míst je závislá na rozmístění a počtu svítidel, [1], [2].

Nejmenší počet bodů je možno vypočítat ze vztahu:

$$n = \frac{1}{k} = \frac{a \cdot b}{5 \cdot k \cdot (a+b)} \quad (6)$$

Kde: a, b ..... rozměry místnosti [m]  
h ..... výška svítidla nad srovnávací rovinou [m]  
k ..... činitel místnosti [-]

Osvětlení je nejzákladnějším prvkem aktivní bezpečnosti, který přispívá ke zvýšení bezpečnosti na pracovištích, [1].

Bakalářská práce je pokračování a rozvedení semestrálního projektu. V rámci této bakalářské práce byl navrhnout přístroj pro měření intenzity osvětlení, tedy luxmetr. Navrhovaný přístroj slouží k měření pracovního osvětlení v rozsahu 50 – 1000 lx.

V první části jsou popsány základní pojmy, veličiny popisující světlo a jejich jednotky. Dále práce obsahuje srovnání optoelektrických součástek (detektorů). Pro tento přístroj byla jako snímací prvek použita fotodioda BPW21. Dioda má předřazený korekční filtr, který upravuje tvar její charakteristiky tak, aby byla podobná charakteristice spektrální citlivosti lidského oka. Jsou zde také popsány jednotlivé funkční bloky z blokového schématu, které jsou v kapitole obvodové řešení rozvedeny.

Navrhovaný obvod obsahuje reálné součástky, které jsou vhodné pro praktickou realizaci systému. Je využit především operační zesilovač typu CMOS, který dokáže správně pracovat již při nízkých napětích, a tudíž je vhodný v zapojení s bateriovým napájením. Hodnoty odporů jsou voleny v řadách E12 a kde je to nevyhnutelné, tak v řadě E24. Hodnoty kapacit odpovídají řadě E12. Zobrazení je provedeno pomocí panelového měřidla s LCD displejem. Napájecí část je řešena 9 V alkalickou baterií. Baterie je vhodná do přístrojů s vysokým odběrem.

Při návrhu DPS je využito programu EAGLE 5.11.0 Light, který je obecně velmi rozšířen a podporován většinou firmami zabývajícími se výrobou DPS. Pomocí systému EAGLE je vytvořen úplný podklad pro výrobu DPS a realizaci celého systému.

Zadání bakalářské práce bylo tímto splněno. Na základě návrhu byl přístroj realizován a ověřen v praxi. Z hlediska návrhu se přístroj hodí spíše k orientačnímu měření.

# Literatura

- [1] PLCH, J. Světelná technika v praxi. IN-EL, Praha, 1999.
- [2] ROZMAN, J., SADOVSKÝ, P., ČERMÁK, D. Diagnostika životního prostředí. Skriptum. Brno: FEI VUT v Brně 2000.
- [3] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. Fyzika. VUTIUM, Brno, 2001.
- [4] VOBECKÝ, J., ZÁHLAVA, V. Elektronika. GRADA Publishing, Praha, 2001.
- [5] FUKÁTKO, T. Detekce a měření různých druhů záření. BEN, Praha, 2007.
- [6] MAŤÁTKO, J. Elektronika. IDEA SERVIS, Praha, 1996.
- [7] SKOK, P. Senzorové systémy. Technická univerzita, Košice, 1991.
- [8] NAVRÁTIL L., ROSINA J. a kolektiv. Medicínská biofyzika. 1.vyd., GRADA Publishing,a.s., Praha 2005.
- [9] DIVIŠ, M. Luxmetr řízený mikropočítačem: Diplomová práce. Brno VUT ,FEKT. 2005, 86s.
- [10] VOŽDA, M. Ultrazvukový indikátor toku krve. Brno: VUT, FEKT, 2009. 37 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.
- [11] Wikipedie – otevřená encyklopedie.; [online], 2003 [cit. 2010-9-12], Dostupné z URL: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Displej\\_z\\_tekut%C3%BDch\\_krystal%C5%AF](http://cs.wikipedia.org/wiki/Displej_z_tekut%C3%BDch_krystal%C5%AF)
- [12] Datasheet.; [online], 2003 [cit. 2010-10-12], Dostupné z URL: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/tlc272.pdf>
- [13] MECA, P. Lux – metr; <http://elektronikacz.borec.cz> [online], 2006 [cit. 2011-17-05], Dostupné z URL: <http://elektronikacz.borec.cz/Data/Lux-metr.htm>
- [14] Wikipedie – otevřená encyklopedie.; [online], 2003 [cit. 2010-30-12], Dostupné z URL: [http://cs.wikipedia.org/wiki/A/D\\_p%C5%99evodn%C3%ADk](http://cs.wikipedia.org/wiki/A/D_p%C5%99evodn%C3%ADk)
- [15] Encyklopedie fyziky.; [online], Poslední revize – neuvedeno [cit. 2010-12-12], Dostupné z URL: <http://fyzika.jreichl.com/index.php>
- [16] Ges elektronik.; [online], Poslední revize 2010 [cit. 2010-12-12], Dostupné z URL: <http://www.ges.cz/stavebnice-g850m-ges07812980.html>
- [17] Wikipedie – otevřená encyklopedie.; [online], 2011 [cit. 2011-15-05], Dostupné z URL: [http://panwiki.panska.cz/index.php/S%C3%A9riov%C3%BD\\_stabiliz%C3%A1tor\\_nap%C4%9Bt%C3%AD](http://panwiki.panska.cz/index.php/S%C3%A9riov%C3%BD_stabiliz%C3%A1tor_nap%C4%9Bt%C3%AD)

[18] PAVLÍČEK, T. Luxmetr; [online], 2009 [cit. 2011-15-05], Dostupné z URL:  
[http://eleschemata.wz.cz/index\\_1.htm](http://eleschemata.wz.cz/index_1.htm)

[19] Wikipedie – otevřená encyklopedie.; [online], 2010 [cit. 2010-28-12], Dostupné z URL:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotometr%C3%A1\\_vely%C4%8Dina](http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotometr%C3%A1_vely%C4%8Dina)

[20] Datasheet.; [online], 2003 [cit. 2010-10-12], Dostupné z URL:  
<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/44651/SIEMENS/BPW21.html>

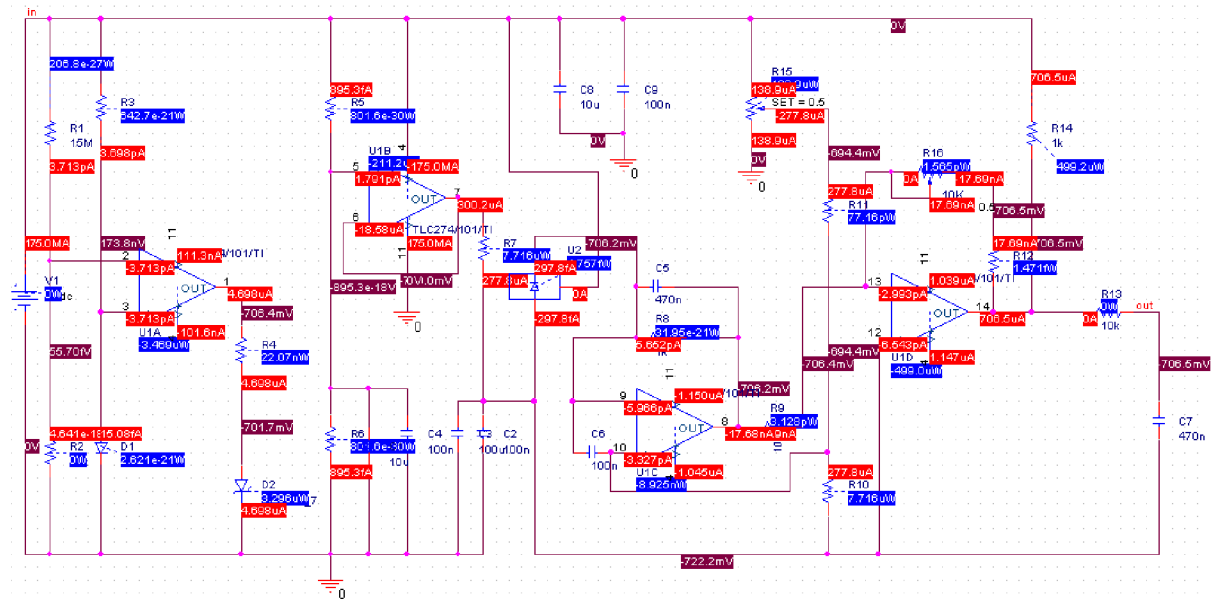
## Seznam zkratek

LCD .....	Liquid Crystal Display
CMOS .....	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
EAGLE.....	Easily Applicable Graphical Layout Editor
DPS .....	Deska plošných spojů

## Seznam příloh

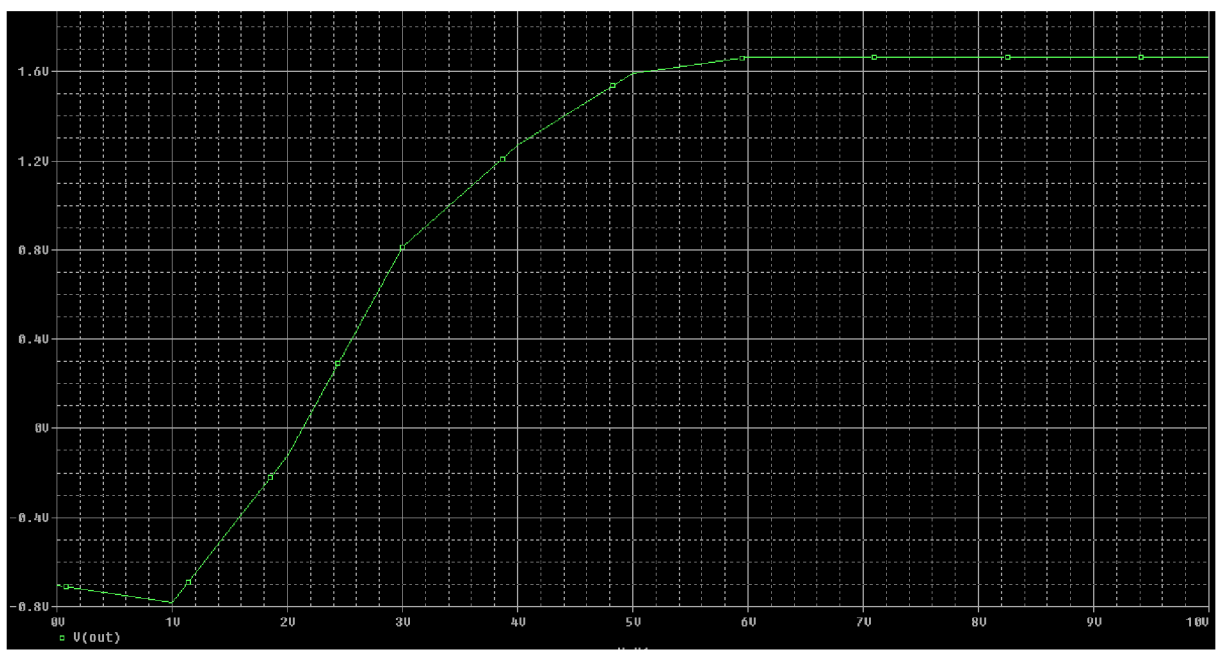
A	Simulace celého obvodu .....	42
B	Závislost výstupního napětí na vstupním.....	42
C	Schéma zapojení z programu EAGLE.....	43
D	Vlastní realizace .....	44

# A Simulace celého obvodu v Pspice



Simulace celého obvodu v Pspice

# B Závislost výstupního napětí na vstupním



Závislost výstupního napětí na vstupním. Charakteristika z programu Pspice

# C Schéma zapojení z programu Eagle

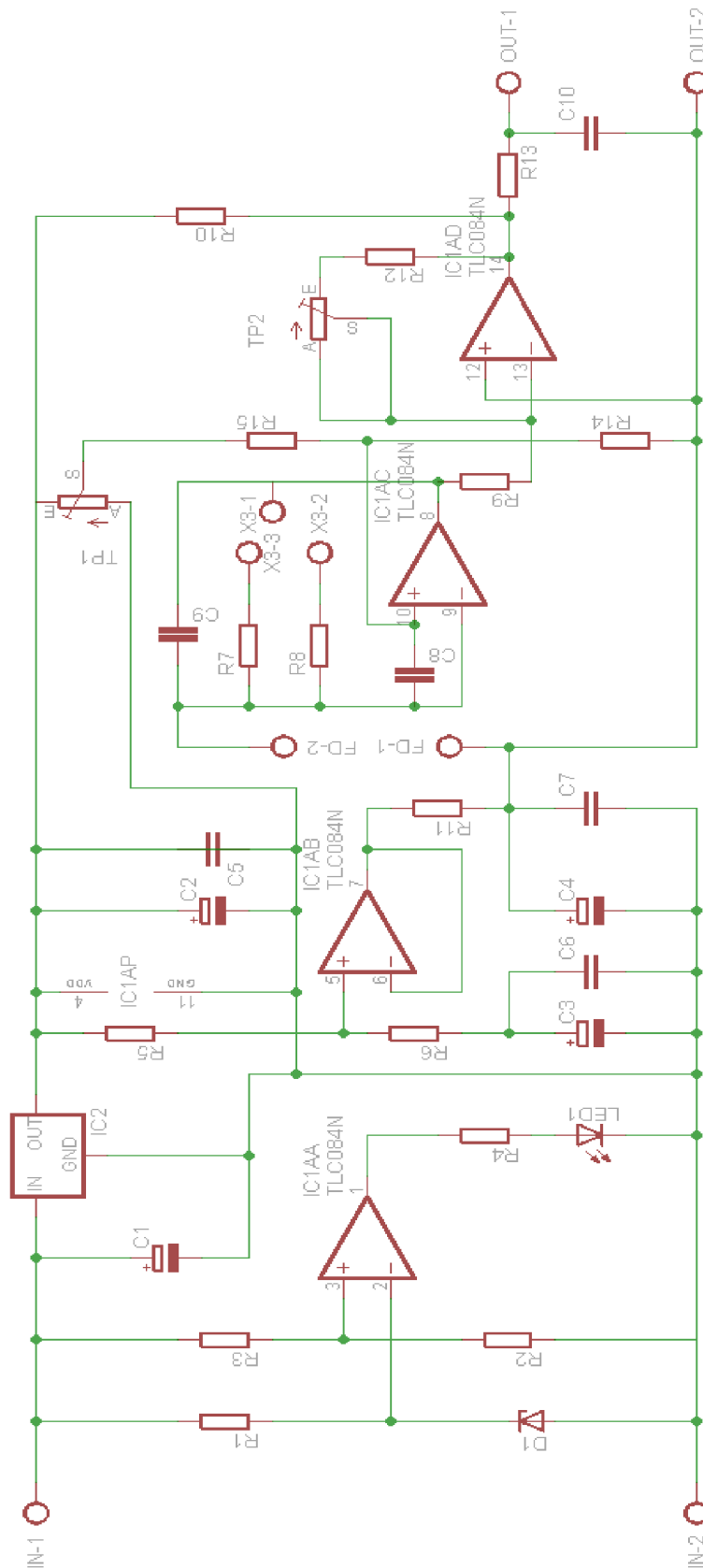
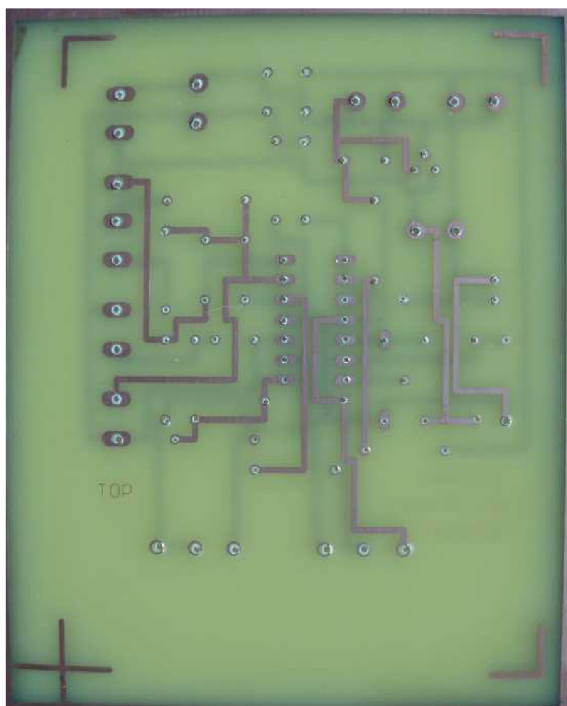
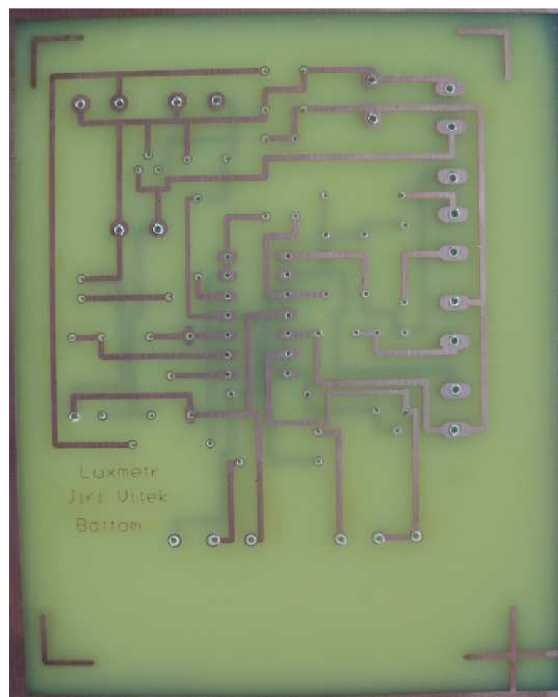


Schéma zapojení

## D Vlastní realizace



Vrchní strana (TOP)



Spodní strana (BOTTOM)



Konečná podoba