

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## AUTOMATICKÉ MĚŘENÍ SPEKTRA LED

AUTOMATIC MEASUREMENT OF LED SPECTRUM

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jindřich Žabka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Skryja

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Jindřich Žabka

**ID:** 203390

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Automatické měření spektra LED

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy měření spektra vyzařování LED. Popište jednotlivé principy funkce spektrometrů, včetně měření spekter vyzařování pomocí disperzního prvku nebo difrakční mřížky. Vyberte si jednu z možností, jak realizovat spektrometr pro LED. Navrhněte pracoviště pro automatizované měření spekter dostupných LED (v nejběžnějších SMD pouzdrech, jako je 1206, 5050 atp.), ve kterém můžete využít programovatelný zdroj RIGOL DP832, multimetr UNI-T UT803 a měřič optického výkonu Vega Ophir. Detektor optického výkonu bude umístěn na posuvném zařízení, které bude řízeno počítačem. Pro navržené pracoviště sestavte softwarovou architekturu.

Realizujte měřící pracoviště a vytvořte uživatelskou aplikaci (GUI) pro jeho ovládání. Navrhněte přípravek, do kterého bude možno upevnit LED nejlépe používaných SMD typů. Ověřte funkčnost navrženého pracoviště změřením spektra dostupných LED a porovnejte získané výsledky s referenčním měřením na spektrometru. Vypracujte vzorový protokol o měření.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SALEH, Bahaa E. A. a Malvin Carl TEICH. Základy fotoniky: Fundamentals of photonics. Praha: Matfyzpress, 1996. ISBN 80-85863-05-7.

[2] DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-730-184-5.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 27.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Skryja

**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

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

## ABSTRAKT

Teoretická část práce seznamuje se světelnými zdroji. Je zde zkoumán princip vzniku světla v těchto zdrojích, základní radiometrické a fotometrické veličiny, podle kterých se jednotlivé zdroje posuzují a jejich provozní parametry. Také jsou zde zmíněny parametry popisující kvalitu světelných zdrojů. V další části se rozebírají LED, jejich obvyklé konstrukce a nejčastější pouzdra SMD LED. Část o optické spektroskopii popisuje nejčastěji užívané komponenty při měření v optice. Praktická část popisuje vhodné uspořádání pracoviště, platformu LabVIEW, proces komunikace s přístroji a postup jakým se na pracovišti pracuje. Přílohou je řešený laboratorní návod.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Elektroluminiscenční dioda; LabVIEW; optický výkon; SMD; spektrum světla

## ABSTRACT

Theoretical part of the thesis is introducing light sources. Here are examined the principles of light generation in these light sources, basic radiometry and photometry variables, according to which are these sources sorted and their operating parameters. The parameters describing quality of light sources are also mentioned here. Next part examines LEDs, their usual construction types and most common SMD LED packages. Part about optical spectroscopy describes usually used components for optical measurement. Practical part narrates appropriate organization of workplace, LabVIEW platform, communication process with instruments and a guide describing measure process. There is a solved laboratory protocol as an attachment.

## KEYWORDS

Light Emitting Diode; LabVIEW; optical power; SMD; spectre of light

ŽABKA, Jindřich. *Automatické měření spektra LED*. Brno, 2021, 54 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce: Ing. Petr Skryja

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma „Automatické měření spektra LED“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 uvedené semestrální práce 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Skryjovi za vedení, konzultace, velkou trpělivost a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

Úvod	10
<b>1 Světlo a jeho měření</b>	<b>11</b>
1.1 Světlo	11
1.2 Radiometrie a fotometrie	11
1.2.1 Radiometrické veličiny	12
1.2.2 Fotometrické veličiny	13
1.2.3 Pomocné veličiny	15
<b>2 Elektrické zdroje světla</b>	<b>17</b>
2.1 Základní parametry světelných zdrojů	17
2.1.1 Teplota chromatičnosti $T_C$	17
2.1.2 Index podání barev $R_a$	17
2.1.3 Měrný světelný výkon $\eta$	18
2.1.4 Životnost	18
2.1.5 Příkon $P$	19
2.2 Rozdělení elektrických zdrojů světla	19
<b>3 Diody typu LED</b>	<b>20</b>
3.1 Provozní parametry	20
3.2 PN přechod	20
3.3 Konstrukce LED	21
3.4 Bílá LED	23
3.5 Pouzdra SMD LED	24
<b>4 Optická spektroskopie</b>	<b>26</b>
4.1 Zdroj světla	26
4.2 Disperzní prvky	26
4.3 Detektor	28
4.3.1 Typy detektorů a princip jejich funkce	29
4.4 Další optické komponenty	30
4.4.1 Optické filtry	30
4.4.2 Zrcadla	31
<b>5 Návrh měřicího pracoviště</b>	<b>32</b>
5.1 Použité nástroje	32
5.2 Schéma zapojení	34

<b>6</b>	<b>Realizace pracoviště</b>	<b>35</b>
6.1	Příklad výpočtu vhodného umístění fotodiody . . . . .	35
6.2	Desky plošných spojů pro LED . . . . .	36
6.3	Prostředí NI LabVIEW . . . . .	37
6.3.1	SCPI standard . . . . .	37
6.3.2	OphirLMMeasurement . . . . .	38
6.3.3	Uživatelské rozhraní . . . . .	38
6.3.4	Důležité části blokového diagramu . . . . .	39
6.4	Sestavené pracoviště . . . . .	42
6.5	Postup měření . . . . .	42
6.6	Naměřené hodnoty . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Porovnání s katalogovými listy</b>	<b>47</b>
	<b>Závěr</b>	<b>48</b>
	<b>Literatura</b>	<b>49</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>51</b>
<b>A</b>	<b>Uživatelské rozhraní aplikace</b>	<b>52</b>
<b>B</b>	<b>Osazené DPS a seznam součástek</b>	<b>53</b>
B.1	Seznam součástek . . . . .	53
<b>C</b>	<b>Obsah přiloženého ZIP souboru</b>	<b>54</b>



# Seznam obrázků

1.1	Fotometrická plocha svítivosti (převzato z [5])	14
1.2	Jas vůči pozorovateli (převzato z [5])	15
1.3	Definice prostorového úhlu (převzato z [5])	15
1.4	Závislost $V(\lambda)$ na vlnové délce (upraveno z [4])	16
2.1	Teplota chromatičnosti od teplého do studeného odstínu (převzato z [5])	17
2.2	Znázornění indexu podání barev (převzato z [10])	18
3.1	Struktura LED (převzato z [2])	21
3.2	Konstrukce DIP LED (upraveno z [11])	22
3.3	Konstrukce SMD LED (převzato z [8])	22
3.4	(a) Konstrukce COB [8](b) Porovnání při osazení na ploše $10 \times 10$ mm [13]	23
3.5	Zobrazení jednotlivých pouzder [14]	24
4.1	Snellův zákon a lom na hranolu (upraveno z [16])	27
4.2	Druhy difrakčních mřížek (Upraveno z [18])	28
5.1	Rigol DP832 (převzato z [22])	32
5.2	(a) Vega Ophir [24](b) Fotodioda PD300 [24]	33
5.3	Mřížky prodávané Thorlabs (převzato z [18])	33
5.4	Schéma zapojení pracoviště	34
6.1	Nákres pro výpočet vzdáleností na pracovišti (nakresleno v Inkscape)	36
6.2	(a) Schéma desky (b) Deska	36
6.3	(a)(b) Náhledy na 3D objekt (c) Reálný objekt	37
6.4	Navázání komunikace	39
6.5	Výběr LED	40
6.6	Nastavení hodnot napájecího zdroje	40
6.7	Nastavení kroku grafu	41
6.8	Nastavení kroku grafu	42
6.9	(a) Pracoviště (b) Rozklad světla na mřížce	43
6.10	Závislosti pro pouzdro 5730	45
6.11	Závislosti pro pouzdro 5050	45
6.12	Závislosti pro pouzdro 2835	46
6.13	Závislosti pro pouzdro 3528	46
7.1	Referenční měření z katalogových listů [15]	47
A.1	GUI	52
B.1	Osazené desky plošných spojů	53

# Seznam tabulek

1.1	Fotometrické veličiny odpovídající radiometrickým . . . . .	11
3.1	Typické hodnoty parametrů jednotlivých SMD pouzder . . . . .	25

# Úvod

Účelem této bakalářské práce je seznámení čtenáře s parametry diod LED a měření jejich spektrální rozložení barev pomocí prostředí LabVIEW. Tato práce poskytuje přehled nejdůležitějších radiometrických a fotometrických veličin a vztah mezi nimi. Pro lepší pochopení problematiky osvětlování jsou zde zmíněny i další, výrobci běžně udávané parametry, které blíže popisují jednotlivé světelné zdroje. Mezi ně patří především teplota chromatičnosti, index podání barev a měrný světelný výkon svítidla. V další části se práce zabývá elektroluminiscenčními diodami, přičemž je rozebrán princip vzniku světla v těchto diodách, PN přechod, jejich provozní parametry a jaká obvyklá pouzdra SMD LED. Jelikož vývoj elektroluminiscenčních diod stále pokračuje, jsou pro tuto aplikaci vybrány jak zastaralé, tak i nové diody. Na to navazuje kapitola o optické spektroskopii, která je rozdělena na jednotlivé laboratorní elementy často využívané při měření. Důraz se přitom klade na seznámení s disperzními prvky ve spektroskopii a jejich rozdíly. Praktická část představuje použité nástroje a jak funguje jejich komunikace při připojení k počítači přes USB sběrnici. Hlavním cílem praktické části je realizace automatizovaného pracoviště pro měření s intuitivní uživatelskou aplikací. Nedílnou součástí je tak i návrh zapojení samotného pracoviště, desek plošných spojů k rozsvícení diod a protokolu k měření.

# 1 Světlo a jeho měření

## 1.1 Světlo

Světlem rozumíme část spektra elektromagnetického záření, charakterizovaného frekvencí či vlnovou délkou, které dokážeme vidět. Viditelné světlo má vlnové délky v rozmezí  $\lambda = 380 \div 780$  nm, což odpovídá frekvencím v rozsahu  $f = 789 \div 384$  THz. Ultrafialové záření má kratší vlny, jmenovitě o délkách mezi  $\lambda = 10 \div 380$  nm. Infracervené záření navazuje na viditelné světlo, ale šíří se pomaleji, jeho vlnové délky jsou mezi 780 nm a 100  $\mu$ m. Vztah frekvence  $f$  a vlnové délky  $\lambda$  k rychlosti světla  $c$  je dán dle následující rovnice [1].

$$c = f\lambda \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (1.1)$$

## 1.2 Radiometrie a fotometrie

K popisu vlastností elektromagnetického záření se užívá škála veličin. Záření o libovolné vlnové délce, včetně viditelného světla, popisuje radiometrie. Fotometrické veličiny jsou však omezeny pouze na část spektra viditelnou lidským okem a každé této veličině přímo odpovídá radiometrická. Z fyzikálního hlediska je tedy radiometrie objektivním popisem vlastností právě zkoumaného záření. Ke snadnějšímu rozlišení jednotlivých veličin bude u radiometrických napsán dolní index “ $e$ ”, u fotometrických “ $v$ ” [3][4].

Tab. 1.1: Fotometrické veličiny odpovídající radiometrickým

Radiometrické veličiny	Značka	Jednotka	Fotometrické veličiny	Značka	Jednotka
Zářivý tok	$\Phi_e$	W	Světelný tok	$\Phi_v$	lm
Ozáření	$E_e$	$\text{W m}^{-2}$	Osvětlenost	$E_v$	lx
Zářivost	$I_e$	$\text{W sr}^{-1}$	Svítivost	$I_v$	cd
Zář	$L_e$	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$	Jas	$L_v$	$\text{cd m}^{-2}$

## 1.2.1 Radiometrické veličiny

### Zářivá energie $Q$

Jde o energii, kterou vyzařuje zdroj záření. Jeho jednotkou je joule, značen [J] [3].

### Zářivý tok $\Phi_e$

Také označován jako optický výkon. Jeho jednotkou je watt [W]. Vyjadřuje množství zářivé energie  $Q$ , která prošla určitou plochou za element času dle vztahu [3][4]

$$\Phi_e = \frac{dQ}{dt} \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W} \right] \quad (1.2)$$

### Ozáření $E_e$ a intenzita vyzařování $M_e$

Ozáření  $E_e$  vyjadřuje množství zářivého toku, který dopadá na plochu. Jednotkou je watt na metr čtvereční [ $\text{W m}^{-2}$ ].

Intenzita vyzařování  $M_e$ , která má stejné jednotky, vyjadřuje množství zářivého toku, jenž je naopak plochou vyzářen [3][4].

$$E_e ; M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (1.3)$$

### Zářivost $I_e$

Tato veličina je vztažena k přibližně bodovému zdroji. Popisuje část zářivého toku  $d\Phi_e$ , která připadá určitému elementu prostorového úhlu  $\Omega$ . Jednotkou je tudíž podíl jejich jednotek [ $\text{W sr}^{-1}$ ] [3][4].

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad [\text{W sr}^{-1}] \quad (1.4)$$

### Zář $L_e$

K jednoduššímu popisu nejdříve bude uveden vztah, kterým je definována.

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dA d\Omega \cos \theta} \quad [\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}] \quad (1.5)$$

Alternativně pak lze použít vztahu pro zářivost 1.4:

$$L_e = \frac{dI}{dS \cos \theta} \quad [\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}] \quad (1.6)$$

Uvažujme plochu  $S$  emitující záření. Zář popisuje zářivost obrazu elementu  $dS$  této plochy ve sledovaném směru. Průmět zdánlivé plošky elementu je posunut o  $\theta$  od normály skutečné plochy, tak aby byla ve směru pozorování kolmá. Pokud bude

celková plocha malá a zároveň bude i malý prostorový úhel, bude záře vyšší, než kdyby plocha či úhel byly vyšší při totožném zářivém toku [3][4].

## 1.2.2 Fotometrické veličiny

Jak již bylo řečeno v 1.2, tyto veličiny jsou vztaženy k citlivosti lidského oka. Oko je nejcitlivější na světlo o vlnové délce  $\lambda = 555 \text{ nm}$ . Z této vlnové délky se bude vycházet pro přechod z radiometrických na fotometrické veličiny pomocí  $K_m$  viz 1.2.3 [3].

### Světelný tok $\Phi_v$

Je veličina, kterou lidské oko dokáže vnímat při vystavení zářivému toku. Jeho jednotkou je lumen, značen [lm]. Pro určení množství je však potřeba určit elementární světelný tok ve všech směrech vyzařování, přičemž sumací bude získán úhrnný světelný tok. Pro vyčíslení lze využít následující rovnice [1][3][4].

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad [\text{lm}] \quad (1.7)$$

$K_m$  : maximum světelné účinnosti záření je rovna  $K_m = 683 \text{ [lm W}^{-1}\text{]}$

$V(\lambda)$  : hodnota poměrné světelné účinnosti pro určitou vlnovou délku

$\Phi_e$  : hodnota zářivého toku  $\Phi_e(\lambda)$  [W] pro jednotlivé úseky vlnové délky  $d\lambda$  z rozsahu integrálu

### Osvětlenost $E_v$ a světlení $M_v$

Parametr  $E_v$  popisuje množství světelného toku  $\Phi_v$  dopadající na plochu  $S$ .  $M_v$  světelný tok z plochy  $S$  vyzářený.

$$E_v ; M_v = \frac{d\Phi_v}{dS} \quad [\text{lx}] \quad (1.8)$$

Osvětlenost je v praxi světelné techniky nejspíše nejsledovanějším parametrem. Jednotkou je *lux*, značen [lx], rozměr jednotky 1 [lx] je 1 [lm m<sup>-2</sup>]. Osvětlenost však rychle klesá se vzdáleností, respektive je **nepřímo úměrná** čtverci vzdálenosti  $l$  od ideálně bodového zdroje světla o svítivosti  $I$  a je **přímo úměrná** cosinu úhlu  $\alpha$  pod kterým světlo dopadá na bod  $X$  a jeho přílehlou plochu [1][5][4].

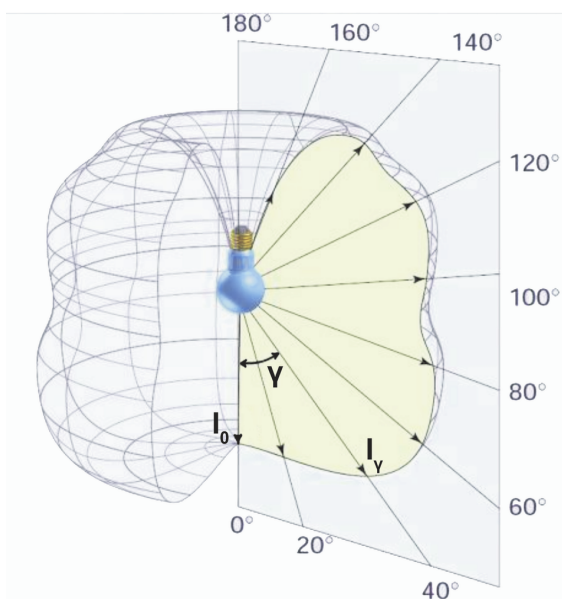
$$E_X = \frac{I}{l^2} \cdot \cos \alpha \quad [\text{lx}] \quad (1.9)$$

### Svítivost $I_v$

Svítivost je jedna ze základních jednotek SI, udávaná v jednotkách kandela [cd], která je definována světelným tokem  $\Phi_v$  a prostorovým úhlem  $\Omega$  vztahem

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad [\text{cd}] \quad (1.10)$$

Tento parametr tedy popisuje, jaké je rozložení světelného toku do různých směrů od zdroje. Svítivost je definována pro bodový světelný zdroj, přičemž jako vrchol prostorového úhlu se zde uvažuje *světelný střed* vyzařovací plochy svítidla. Složením koncových bodů jednotlivých vektorů svítivosti v úhlech vznikne *fotometrická plocha svítivosti*, ze které se pak vyčlení řezy, které se dají vynést v polárních souřadnicích (*čáry svítivosti*). Tyto grafy pak názorně popisují vyzařování zdroje v různých směrech [1][9].



Obr. 1.1: Fotometrická plocha svítivosti (převzato z [5])

### Jas $L_v$

Vyjadřuje množství světelného toku vyzářeného, průchozího či odraženého světla z plochy, přenášeného paprsky pod určitým úhlem, směrem k pozorovateli. Jas, nebo také *měrná svítivost*, je udáván v jednotkách  $[\text{cd m}^{-2}]$ , což vychází z jeho definičního vztahu:

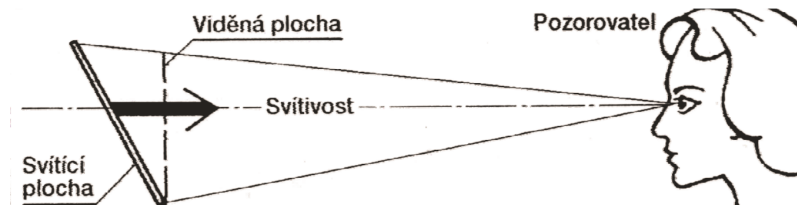
$$L_v = \frac{dI_v}{dS \cdot \cos \gamma} \quad [\text{cd m}^{-2}] \quad (1.11)$$

$dI_v$  : je svítivost  $dI = d\Phi_v/d\Omega$  [cd] ve směru pod úhlem  $\gamma$  malé plochy  $dS$

$dS$  : velikost svítící plošky  $[\text{m}^2]$

$\cos \gamma$  :  $\cos$  úhlu  $[\text{°}]$  vzhledem k normále pozorované plochy

Na kontrast jasů přímo reaguje zrakový orgán. Vychází z radiometrické veličiny zář 1.2.1. Záleží tedy na poloze pozorovatele, velikosti světelné plochy a velikosti prostorového úhlu [1][4][5].



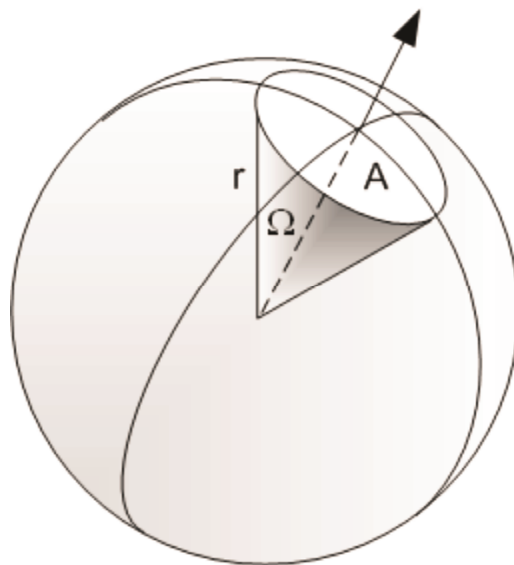
Obr. 1.2: Jas vůči pozorovateli (převzato z [5])

### 1.2.3 Pomocné veličiny

#### Prostorový úhel $\Omega$

Je použit pro definici dalších parametrů tudíž je potřeba si tento pojem také definovat. Prostorový úhel je geometrická veličina, která je nejjednodušeji udávána jako velikost plochy vyřatá obecnou kuželosečkou na povrch jednotkové koule, přičemž jeho velikost se určí ze vztahu

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad [\text{sr}] \quad (1.12)$$



Obr. 1.3: Definice prostorového úhlu (převzato z [5])

kde  $A$  je plocha vyřatá na povrchu koule a  $r$  je poměr koule. Jednotkou  $\Omega$  je steradián [sr]. Maximální hodnota, které může prostorový úhel dosáhnout je  $\Omega_{max} = 4\pi$ , tedy pro povrch celé koule. Vrcholem  $\Omega$  je střed záření, ideálně se uvažuje bodový zdroj záření [5].

#### Světelná účinnost $K$

Vypovídá o tom, kolik zářivého toku dokáže lidské oko pojmout jako světelný tok. Při světle o  $\lambda = 555 \text{ nm}$  je tato účinnost maximální  $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$ . To znamená,



že 1 W zářivého toku tohoto monochromatického světla převede oko na 683 lm [4].  
Určí se jako:

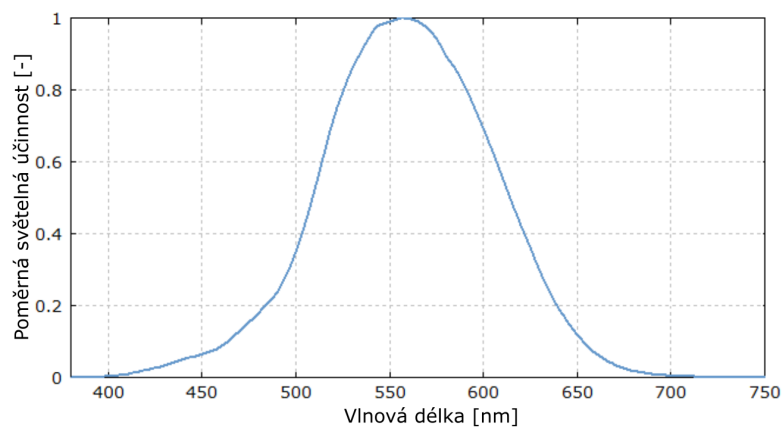
$$K = \frac{d\Phi_v}{d\Phi_e} \quad [\text{lm W}^{-1}] \quad (1.13)$$

### Poměrná světelná účinnost $V(\lambda)$

Je to poměr světelné účinnosti o jiné vlnové délce než 555 nm a maximální účinnosti  $K_m$ , tedy vztahem [4]:

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} = \frac{K(\lambda)}{683} \quad [-] \quad (1.14)$$

Maximální hodnota  $V(\lambda)$  je 1 a to právě při  $\lambda = 555$  nm jak je naznačeno na následujícím obrázku:



Obr. 1.4: Závislost  $V(\lambda)$  na vlnové délce (upraveno z [4])

Přibližná funkce k zjištění  $V(\lambda)$ , kde se  $\lambda$  udává v mikrometrech, lze najít v [6].

$$V = 1.019 \cdot e^{-285.4(\lambda-0.559)^2} \quad [-] \quad (1.15)$$

### Přepočítání mezi radiometrickými a fotometrickými veličinami

Konverze na fotometrickou veličinu se získá vynásobením maximální světelné účinnosti  $K_m$ , poměrné světelné účinnosti  $V(\lambda)$  a odpovídající radiometrické veličiny. Zjednodušeným zápisem jako [6]:

$$\text{Fotometrická veličina} = \text{Radiometrická veličina} \cdot K_m \cdot V(\lambda)$$

## 2 Elektrické zdroje světla

Tyto umělé zdroje světla používají k emitování optického záření jeden ze tří základních způsobů přeměny elektrické energie. Podle nich se elektrické zdroje světla dělí na teplotní, výbojové a elektroluminiscenční. Kvalita umělých zdrojů světla je pak udávána jeho parametry, které jednoznačně charakterizují jeho vlastnosti. Mezi základní parametry podle [5] patří světelný tok viz 1.2.2, měrný výkon, náhradní teplota chromatičnosti, index podání barev, životnost a příkon. Provozní parametry jmenovité napětí, jmenovitý proud a příkon budou zmíněny u zkoumaných svítidel [1].

### 2.1 Základní parametry světelných zdrojů

#### 2.1.1 Teplota chromatičnosti $T_C$

Tato teplota je odvozena od zahřívání absolutně černého tělesa, které při zahřátí na určitou teplotu vydává záření dané barvy podle obr. 2.1. Teplota chromatičnosti se udává v Kelvinech [K] a rozděluje barvy na teplé a studené. Tento parametr má při osvětlování velkou váhu, jelikož ovlivňuje i psychiku člověka z pohledu vlivu na biorytmus. Západ slunce má nižší hodnoty teploty než jaké jsou při východu, což lidem fyziologicky podněcuje vnímání teplejší barvy jako klidnější a vhodnější pro osvětlení před spánkem [5].

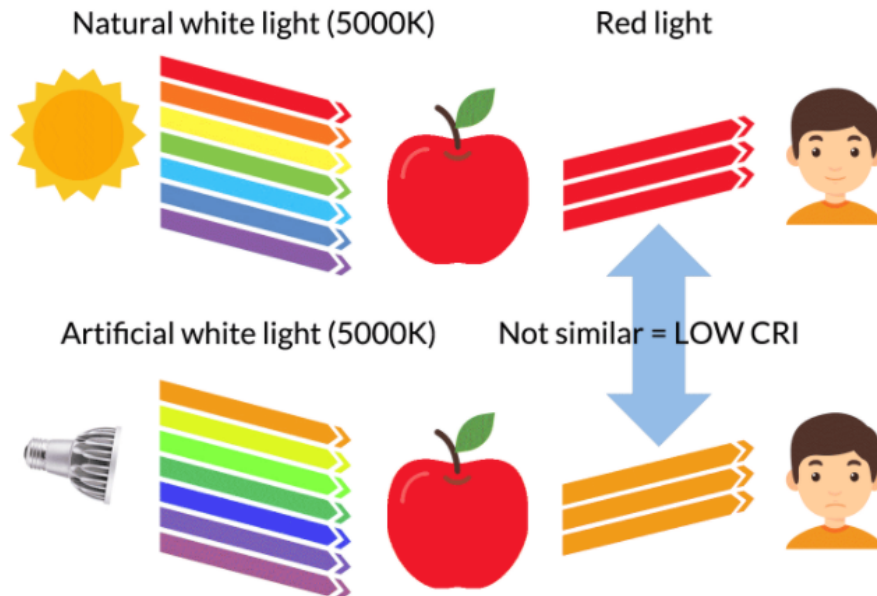


Obr. 2.1: Teplota chromatičnosti od teplého do studeného odstínu (převzato z [5])

#### 2.1.2 Index podání barev $R_a$

CRI (*Color Rendering Index*) je bezrozměrná veličina popisující schopnost člověka vnímat věrně a živě barvy při osvětlení předmětů určitým světelným zdrojem. Index se uvádí v hodnotách mezi 0 až 100, přičemž při hodnotě 100 je podání barev stejné jako při osvětlení referenčním ideálním či přírodním denním světlem, kdežto při hodnotě 0 jsou jednotlivé barvy naopak nerozeznatelné, jelikož zdrojem je monochromatické světlo. Dvě různá světla se stejnou teplotou chromatičnosti  $T_C$  mohou mít velmi rozdílné  $R_a$ , tudíž stejná barva světla neznamená, že obě světla budou

stejně vhodná k osvětlování stejných prostor. Rozhodujícím faktorem je zde spektrální složení světla jednotlivých zdrojů. Tento jev je tedy při pohledu přímo do světla neviditelný a projeví se až při osvětlování jednotlivých barev. Obvyklá hodnota při osvětlování prostorů by měla přesahovat hodnotu 80 [5][10].



Obr. 2.2: Znázornění indexu podání barev (převzato z [10])

### 2.1.3 Měrný světelný výkon $\eta$

Jeden z nejdůležitějších světelně-technických parametrů je světelný výkon. Ten udává, jaké množství energie v podobě světelného toku  $\Phi_v$  je schopen světelný zdroj přeměnit na světlo z 1 W [7][8]. Tento výkon je definován dle následujícího vztahu

$$\eta = \frac{\Phi_v}{P} \quad [\text{lm W}^{-1}] \quad (2.1)$$

### 2.1.4 Životnost

Během činnosti elektrických zdrojů nastávají fyzikální a chemické procesy, které zapříčínají postupné zhoršování jejich parametrů, či jejich úplné zničení, jako například v případě přepálení vlákna v žárovce [1][5]. Životnost se měří v hodinách a rozděluje se na:

Fyzickou : popisující celkovou dobu svícení do okamžiku, kdy je zdroj nepoužitelný

Průměrnou : udávající dobu, po které svítí 50 % svítidel sledované osvětlovací soustavy při referenčních provozních podmínkách

Užitečnou : udávající čas po kterém světelný tok svítidla klesne na určitou předepsanou úroveň, obvykle  $60 \div 80$  % hodnoty  $\Phi$

### 2.1.5 Příkon $P$

Příkon je elektrická energie dodávaná ze sítě, přičemž na obalech samotných svítidel je uváděn obvykle *činný příkon*, tedy příkon, který samotné zařízení přeměňuje z elektrické energie na jinou formu. *Celkový příkon*, který je potřeba k svítidlu dopřít, se liší podle typu elektrického zdroje světla. Při použití předřadníku se k samotnému svítidlu připočítávají i ztráty na předřadném prvku. Například klasické žárovky mají *činný příkon* shodný s celkovým. Měří se v jednotkách [W] [1].

## 2.2 Rozdělení elektrických zdrojů světla

### Teplotní světelné zdroje

Základní charakteristikou těchto zdrojů je průchod elektrického proudu pevnou látkou, která se zahřívá na vysoké teploty a emituje tak světlo. V této kategorii jsou žárovky a halogenové žárovky. Dnes se v žárovkách využívají výhradně wolframová vlákna. Obsah baňky je u žárovky vyplněn argonem nebo kryptonem společně s dusíkem, který zabraňuje vzniku výbojů mezi závity vlákna. Halogenové žárovky mají náplň složenou obvykle z kryptonu, dusíku a sloučeniny s obsahem halogenu [1].

### Výbojové světelné zdroje

Dělí se dále na nízkotlaké a vysokotlaké výbojky. Mezi nízkotlaké patří zářivky, indukční a sodíkové výbojky. Mezi vysokotlaké pak hlavně výbojky halogenidové, xenonové a sodíkové. Principem jsou kinetické srážky elektronů, vysílaných z elektrody, s atomy plynů, kterými je výbojka plněna, přičemž při jejich srážce vznikne optické záření [1].

### Elektroluminiscenční světelné zdroje

Do této skupiny spadají diody typu LED (*Light Emitting Diode*), LD (*Laser Diode*) a elektroluminiscenční panely. LED emitují světlo při přiložení proudu v propustném směru na PN přechod, kde je využito spontánní emise během rekombinace nosičů na přechodu. Laserové diody pracují na principu stimulované emise [2]. Elektroluminiscenční panely využívají emitace světla elektrickým polem v luminoforu [1].

## 3 Diody typu LED

### 3.1 Provozní parametry

#### Jmenovité napětí $V_F$

Tento parametr označuje napěťové hranice, v datasheetech značené obvykle jako  $V_F$ , kde je LED v pracovním stavu. Do prahového napětí diodou neprochází téměř žádný proud. Po překročení prahového napětí se LED otevře, přičemž má malý odpor a začne jí proudit proud, na němž je závislý svit diody. Tento parametr je výrobce povinen uvádět na obalu či výrobku [1].

#### Jmenovitý proud $I_F$

Proud  $I_F$ , který prochází diodou v otevřeném stavu. Malá změna napětí však může zapříčinit velkou změnu proudu a dioda se snadno zničí, tudíž je zapotřebí při návrhu obvodu myslet na ochranu diody, například sériovým rezistorem. Běžně nastavujeme 50 – 80 % maximálního uváděného proudu podle přítomných teplotních podmínek, požadavků na účinnost a životnost diody. Pro napájení se využívají většinou zdroje konstantního proudu [1][7]. Díky tomuto proudu se dají pro uživatele orientačně rozlišit LED na tři podskupiny:

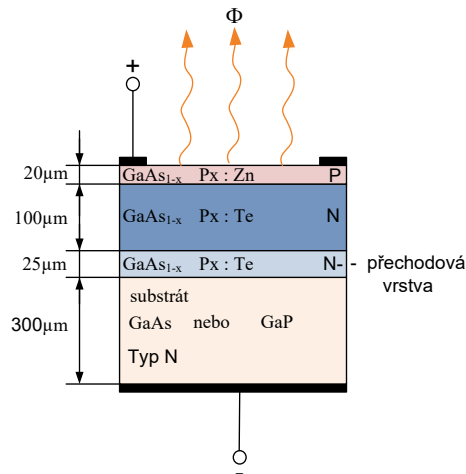
- a) *Nízkopříkonové*, kde se proud pohybuje od 1 do 2 mA.
- b) *Standardní*, kde se proud pohybuje od 10 do 60 mA, u modernějších diod do hodnot 200 mA.
- c) *Výkonové (High Voltage)*, kde se proud pohybuje v hodnotách stovek mA.

### 3.2 PN přechod

LED využívají homogenního PN přechodu mezi stejnorodými materiály, tedy se stejnou krystalovou strukturou, ale s rozdílným typem vodivosti. PN přechod je vytvořen spojením nevlastního polovodiče typu P, jehož majoritními nosiči náboje jsou díry, a typu N, jehož majoritními nosiči jsou elektrony.

Pro vytvoření rovnovážného stavu dojde k difúzi majoritních nosičů: díry z P oblasti se přesunují do N oblasti a elektrony z oblasti N se přesunují do oblasti P. Zároveň dojde kvůli elektrickému poli na přechodu k driftu minoritních nosičů: elektrony z oblasti P do oblasti N a díry z N oblasti do P, tudíž v opačném směru než difúze. Postupně se potenciálový rozdíl na přechodu ustálí na hodnotě označované jako *difúzní napětí*  $U_D$  a přechod je v rovnovážném stavu.

Po přivedení proudu v propustném směru začne téct přechodem difúzní proud majoritních nosičů, které se po překročení přechodu stanou minoritními a musí se rekombinovat. Elektronů, jež byly excitovány do vodivostního pásu, musí při rekombinaci uvolnit energii, která odpovídá šířce zakázaného pásu, přičemž může dojít k *zářivé rekombinaci*. Tento jev se nazývá *spontánní emise*. Pro emitaci viditelného světla (viz. 1.1) je potřeba užití polovodičů s šířkou zakázaného pásu od 1.7 eV do 3.1 eV. Nejčastěji využívanými materiály k výrobě jsou kombinace prvků Ga, As, In, P a Al [2].



Obr. 3.1: Struktura LED (převzato z [2])

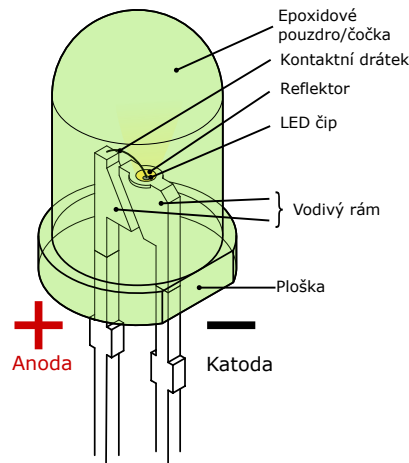
### 3.3 Konstrukce LED

Tato dioda představuje součástku, která obsahuje LED čip či kombinaci čipů a ty jsou pak zakryty vrstvami materiálů s požadovanými optickými a ochrannými vlastnostmi. Z pouzdra jsou pak vyvedeny kontakty pro připojení na DPS. Během historického vývoje se pro různé účely vyvinulo několik typů pouzder pro LED, zvláště z důvodů zvyšování výkonnosti diod a zlepšení systému odvodu tepla. Všechny typy mají jasně znázorněnou polaritu, jde o seřiznutí na straně katody, aby při instalaci nedošlo k zapojení ve špatném směru polarizace [8][11].

#### DIP LED

DIP (*Dual In-line Package*) LED má čip (PN přechod) umístěn na reflektoru. K čipu je přiveden proud od kontaktů, přičemž kontakty mimo plastové pouzdro, v němž je čip umístěn, jsou ohebné a dioda je pomocí nich připevněna k DPS. Pouzdrem je zalit samotný PN přechod na substrátu, přičemž tvoří současně čočku v dráze světla. Nevýhodou tohoto typu je právě řešení vývodů, jelikož ty nejsou dostatečně účinné

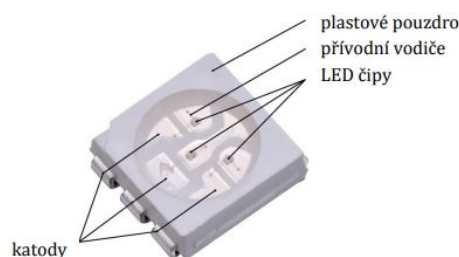
při chlazení diody. DIP nejsou vhodné k osvětlovacím účelům právě kvůli chlazení, jejich využitím jsou předně kontrolky, signálky či na velkoplošných obrazovkách. Naopak jejich výhodou je vysoká mechanická odolnost a také odolnost vůči vlhkosti, kvůli plastem chráněnému PN přechodu. Životnost těchto diod dosahuje v ideálních podmínkách do 30 000 hodin, obvykle však do 20 000 hodin, a jejich maximální výkon se pohybuje kolem  $\eta_{max} = 70 \text{ lm W}^{-1}$  [7][8].



Obr. 3.2: Konstrukce DIP LED (upraveno z [11])

## SMD LED

Dalším typem je SMD (*Surface Mounted Diode*), což je LED upravená pro montáž přímo na DPS pomocí měděných plošek vyčnívajících na stranách. Čip je zde umístěn na třívrstvý hliníkový podklad a zataven do plastového pouzdra. Podklad má s DPS mnohem větší styčnou plochu, což razantně zlepšuje chlazení oproti DIP technologii. Ačkoli může mít SMD stejně velký PN přechod jako DIP, její rozměry jsou výrazně menší, účinnost a životnost jsou větší. Jde o v současnosti nejběžnější užití LED technologie, přičemž nejčastější užití je seskupením většího množství na plochu v LED páscích či LED žárovkách.

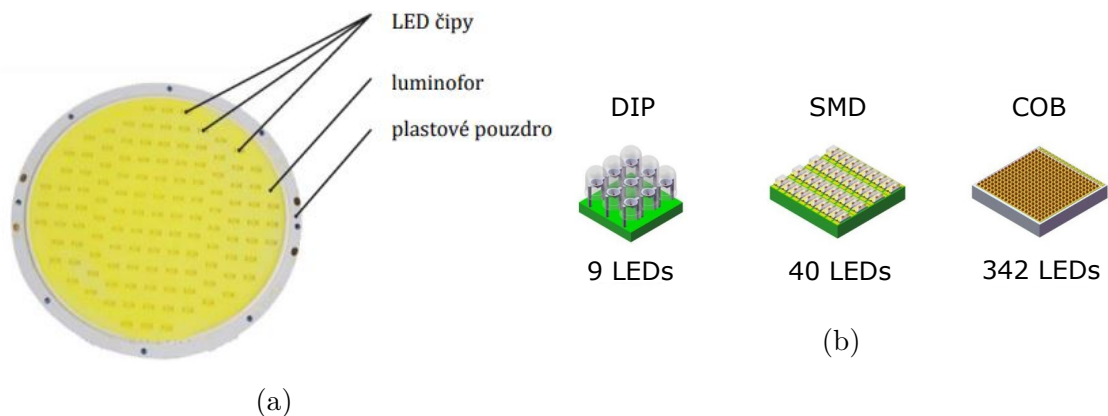


Obr. 3.3: Konstrukce SMD LED (převzato z [8])

Dalším rozdílem je, že v jednom pouzdru mohou být umístěny dva nebo tři čipy najednou s různými barvami, přičemž každý čip má svůj okruh a dva kontakty. Obvyklá deklarovaná životnost SMD je kolem 50 000 hodin, měrný světelný výkon až  $\eta_{max} = 120 \text{ lm W}^{-1}$  a běžným vyzařovacím úhlem je  $\Omega = 120^\circ$  [7][8].

## COB LED

Tato konstrukce je další krok v evoluci LED technologií po SMD. COB (*Chip On Board*) je tvořena seskládáním velkého množství čipů, typicky devět a více, velmi blízko vedle sebe přímo na substrát. Tento modul je umístěn v plastovém pouzdře a překryt luminoforem. Celý modul je často z výroby dodáván na hliníkové základně, která pomáhá s chlazením a tím prodlužuje i životnost. V porovnání s osazením v žárovkách využívajících SMD technologii, kde je osazeno v kruhu například 12 SMD pouzder fungujících jako jednotlivé zdroje světla, se zdá COB jako téměř homogenní zdroj světla, protože COB může mít i 8krát více LED čipů na stejné ploše. Oproti SMD se zvýšil světelný výkon a dál zvyšuje efektivitu při odvodu tepla. Další výhodou je, že bez ohledu na počet čipů je celý modul na jednom okruhu a má pouze dva kontakty, což snižuje riziko poruch [8][12][13].



Obr. 3.4: (a) Konstrukce COB [8](b) Porovnání při osazení na ploše  $10 \times 10 \text{ mm}$  [13]

## 3.4 Bílá LED

Z podstaty fungování LED se dá vyvodit, že jsou schopny vyzářit z PN přechodu vjem pouze určité barvy. Bílé světlo má spojité spektrum s rozsahem vlnových délek v celé oblasti viditelného spektra 1.1. K výrobě bílé LED vznikly dva způsoby. Prvním, starším způsobem, je umístění tří LED čipů do jednoho pouzdra, kde přímým míšením červené, modré a zelené barvy vznikne vjem bílé barvy. Využívá se zde RGB

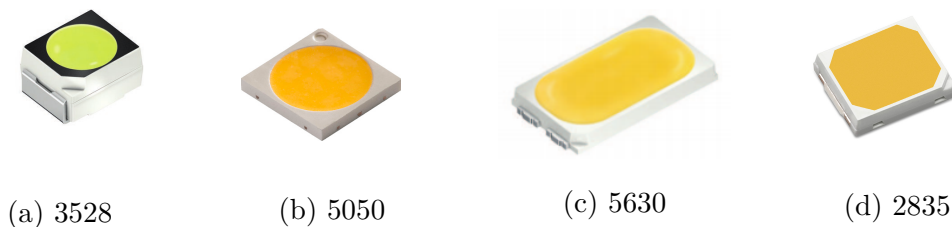


system, který se též užívá například v monitorech počítačů. Nevýhodou tohoto systému je obtížné nastavení správného poměru jednotlivých složek pro správnou emi-taci bílé barvy, prosvítání barevných složek na okrajích světelného kužele a hlavně postupná ztráta původní kvality emitovaného bílého světla v důsledku stárnutí čipů, které navíc stárnou nerovnoměrně. Druhým způsobem je použití fosforescence lumi-noforů, přičemž se užívá diod emitujících buď modré světlo nebo UV záření, které luminofor vybudí. Výsledkem je složení úzkopásmového spektra diody se spojitým spektrem luminoforu. Nevýhodou může být horší index  $R_a$  při užití nevhodného luminoforu, který může potlačovat červenou a zelenou složku spektra [1].

### 3.5 Pouzdra SMD LED

SMD LED se značí kombinací čtyř čísel, které udávají fyzické rozměry diody. Na-příklad čip 3528 má rozměry  $3.5 \times 2.8$  mm. Rozdíly mezi jejich parametry jsou za-znamenané v tabulce 3.1. Tato práce se zabývá standardními LED viz kapitola 3.1. Informace o jednotlivých pouzdech z [14] a technické údaje jsou k nalezení u pro-dejce [15] v sekci dokumentace ke stažení u každé z diod.

#### Jednotlivá zkoumaná pouzdra



Obr. 3.5: Zobrazení jednotlivých pouzder [14]

#### Pouzdro 3528

3528 je jeden z nejstarších, avšak v současnosti stále jeden z nejčastěji používa-ných pouzder na trhu. Typicky obsahují jeden čip, nejsou náročné na chlazení a mají malou energetickou náročnost. Jejich světelný výkon je však menší než u 5050. Nejčastějším použitím je jednobarevné osvětlení například obrazů, poliček, barů atp.

#### Pouzdro 5050

V současnosti nepoužívanější typ SMD, jeho rozměry jsou  $5.0 \text{ mm} \times 5.0 \text{ mm}$ . Dělají se ve trojdiodovém provedení, mají 3x vyšší příkon než 3528, ale přináší vyšší svítivost.

Nevýhodou 5050 je pak vyšší energetická náročnost, rozměry a větší produkce tepla. Jejich nejčastějším využitím jsou RGB pásy.

### **Pouzdro 5630 a 5730**

Jde o nástupce po předchozích dvou pouzdrech, přičemž přináší vyšší svítivost než předchozí dva typy. Konstrukce má rozměry  $5.6 \times 3.0$  mm (respektive  $5.7 \times 3.0$  mm), ale výška čipu je zde nižší, podporující odvod tepla do podkladu. I přes to je však potřeba použít dobré chlazení, jelikož diody mají vysoký příkon.

### **Pouzdro 2835**

V současné době jde o jeden z nejlepších SMD čipů. Od stejně velkého 3528 je rozeznatelný jednoduše podle tvaru a velikosti svítící plochy, kde u 3528 je plocha kruhová a menší a u 2835 typicky obdélníková, pokrývající téměř celou plochu čipu. Tyto diody mají vylepšený odvod tepla svou malou výškou a hliníkovou podložkou na spodní části čipu. Velkou předností těchto diod bývá velmi dobré hodnocení  $R_a$  s hodnotami nad 80.

Tab. 3.1: Typické hodnoty parametrů jednotlivých SMD pouzder

<b>Typ pouzdra</b>	<b><math>I_F</math> [mA]</b>	<b><math>V_F</math> [V]</b>	<b><math>I</math> [lm]</b>
3528	20	$3 \div 3.4$	8
5050	60	$3 \div 3.4$	$22 \div 24$
5630 a 5730	150	$3 \div 3.4$	$55 \div 60$
2835	30	$3 \div 3.4$	$12 \div 13$

## 4 Optická spektroskopie

Jde o metody zabývající se elektromagnetickým zářením od infračervené oblasti až do oblasti UV záření. Spektrometr je přístroj, který po interakci optického záření s určitým prvkem rozlišuje, jak velká je optická intenzita na různých vlnových délkách. Tato interakce může být buď absorpce, rozptyl, emise či odraz záření. Způsob, jakým se změní původní záření po styku s prvkem, vypovídá o vlastnostech prvku. Spektrometr potřebuje k funkci zdroj zkoumaného záření, prvek, na kterém má dojít k potřebné interakci, detektor, který zaznamená záření po interakci s prvkem a případné optické komponenty pomáhající k nasměrování záření [17][19].

### 4.1 Zdroj světla

Za pomoci zdroje světla jsou zjišťovány informace jako funkce vlnové délky. V případě bílého světla se mluví o spojitém spektru, které po rozkladu tvoří souvislý pás barev, tedy vlnových délek. Dle oblasti zájmu se pak zaměřuje na vybrané vlnové délky [19]. Jako zdroj světla bude využito následujících pouzder SMD LED 3.5.

### 4.2 Disperzní prvky

Tyto metody rozkládají záření do určitých úhlů, kde každému úhlu odpovídá určitá vlnová délka. Po dopadu záření, ať už monochromatického či složeného, na rozhraní vzduchu a optického prvku se část záření odrazí a část projde dovnitř prvku. Pokud je dopad záření jiný než kolmý, dojde k lomu světla. Po vstupu záření se mění směr jednotlivých vlnových délek a jejich rychlost se sníží. Index lomu se označuje  $n$  a je poměrem rychlosti světla ve vakuu  $c$  ku rychlosti  $v$  v daném prostředí.

$$n = \frac{c}{v} \quad [-] \quad (4.1)$$

Obvyklým disperzním prvkem při zkoumání viditelného světla bývá disperzní hranol a difrakční mřížka [3][19].

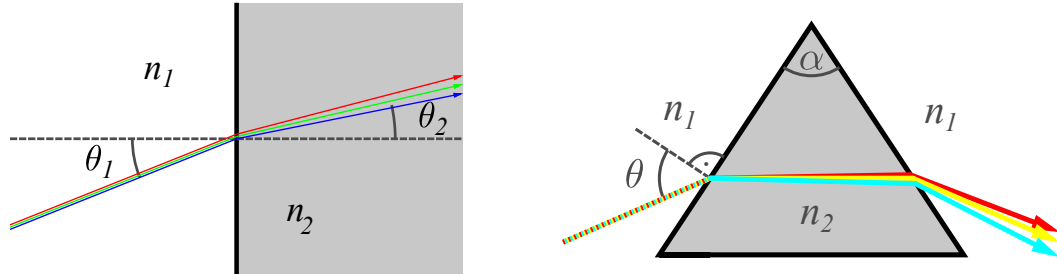
#### Disperzní hranol

rozkládá světlo na rozhraní prostředí vzduch-hranol při vstupu do hranolu a hranol-vzduch při výstupu. Lom na rozhraní vyjadřuje Snellův zákon

$$n_1(\lambda) \cdot \sin \theta_1 = n_2(\lambda) \cdot \sin \theta_2 \quad (4.2)$$

kde  $n(\lambda)$  jsou indexy lomu, které jsou závislé na vlnové délce, relativních permitivitách a permeabilitách prostředí.  $\theta_1$  je úhel dopadu a  $\theta_2$  je úhel lomu. Jelikož je index

lomu závislý na frekvenci, spektrální složky obsažené v bílém světle se budou za rozhraním lámat pod jinými úhly. U hranolu dochází k průchodu rozhraním dvakrát, čímž je rozklad světla výraznější. Výhodou disperzního hranolu je rozklad světla do jednoho směru [16][17].



Obr. 4.1: Snellův zákon a lom na hranolu (upraveno z [16])

### Difrakční mřížka

je utvořena vysokým množstvím periodických vrypů do kovového nebo skleněného materiálu, přičemž vrypy mají vzájemnou vzdálenost  $a$ , nazývanou mřížková konstanta. Díky jejich struktuře dokáží ohýbat světlo. V úhlech, kde se rozložené světlo sejde ve fázi, probíhá konstruktivní interference. Tyto úhly se nazývají difrakčními maximy. Šířka, na které je spektrum rozprostřeno pro jednotlivá maxima, závisí na počtu vrypů a vzdálenosti od mřížky. Vyšší počet vrypů znamená širší rozprostření spektra. Existují transmisní, reflektivní, blazed, holografické a další difrakční mřížky [17].

Do **transmisní mřížky** vstupuje záření na jedné straně pod určitým úhlem  $\theta_i$  od normály povrchu, které se na vrypech z druhé strany rozkládá. Rozložené světlo se dále šíří pod úhly  $\theta_m$ , kde  $m$  jsou řády maxim. Úhel, pod kterým se odklání jednotlivé složky spektra, je závislý na vlnové délce, řádu maxima a periodě mřížky [18].

$$a [\sin(\theta_m) - \sin(\theta_i)] = m\lambda \quad (4.3)$$

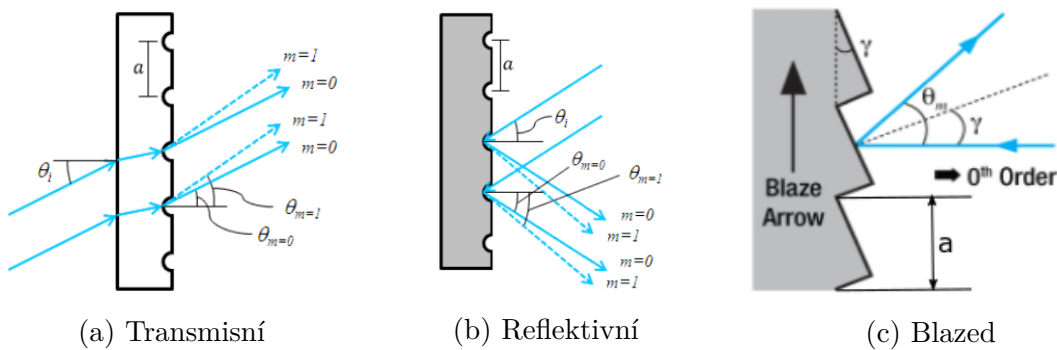
**Reflektivní mřížky** fungují na podobném principu jako transmisní, ale zde je povrch tvořen či potažen odrazivým materiálem, od kterého se světlo odrazí pod úhly  $\theta_m$  korespondujícími s vlnovými délkami a řády maxima [18].

$$a [\sin(\theta_m) + \sin(\theta_i)] = m\lambda \quad (4.4)$$

**Blazed mřížka** má periodické vrypy trojúhelníkového tvaru s určitým úhlem náklonu  $\gamma$  od struktury mřížky a vzdálené  $a$ . Jde o speciální případ transmisní nebo reflektivní mřížky. Její struktura umožňuje zvýšení účinnosti pro určité difrakční maximum, většinou  $m = 1$ , a zmenšuje ztrátu optického výkonu do ostatních řádů, především však nultého. Úhel mezi normálou k struktuře mřížky a normálou k výřezu v mřížce bude roven  $\gamma$  [18][20].

$$a \sin(-2\gamma) = m\lambda \quad (4.5)$$

Při příchodu rovinné vlny se nultý difrakční řád odrazí ve směru normály k struktuře mřížky a  $\theta_m$  na  $2\gamma$ .



Obr. 4.2: Druhy difrakčních mřížek (Upraveno z [18])

### Porovnání disperzních prvků

Hlavní výhodou disperzního hranolu je skutečnost, že úhel odklonu jednotlivých složek spektra je jasně dán. U difrakční mřížky se jednotlivé řády maxim mohou v některých úhlech překrývat. Jeden úhel tedy nebude odpovídat pouze jedné vlnové délce. Intenzita světla nevyužitých řádů zvyšuje nežádoucí šum v měřeném úseku, je tedy potřeba používat filtry. Výhodou mřížek je lineární závislost úhlu na vlnové délce.

## 4.3 Detektor

Je komponenta zachycující záření a převádějící energii fotonů na elektrické signály. Důležitými vlastnostmi jsou rozsah vlnových délek, rychlost, rozsah optických výkonů, dynamický rozsah, velikost apertury, linearita a také kvantová účinnost  $\eta$  [3].

### 4.3.1 Typy detektorů a princip jejich funkce

Pro různé vlnové délky elektromagnetického záření jsou vhodné různé detektory. Dalším aspektem volby detektoru je, zda se jedná o světlo kontinuální, či pulzy. Příkladem často používaných detektorů jsou fotodiody, fotonásobiče a CCD [3].

#### Fotodiody

Jsou to nejčastěji křemíkové diody, které při závěrné polarizaci po dopadu fotonů s energií vyšší než šířka zakázaného pásu, která je u Si rovna  $E_G = 1.12 \text{ eV}$ , generují vnitřním fotoelektrickým jevem páry elektron díra. Takto vygenerované nosiče jsou poté odsávány elektrickým polem, které vzniklo na přechodu díky závěrné polarizaci, čímž je vytvořen fotoproud. Fotoproud je přibližně úměrný dopadající intenzitě světla pro velký rozsah optických výkonů. Jako detektory vykazují vysokou rychlost odezvy, která se může pohybovat od  $10^{-6}$  do  $10^{-10}$  s. Při osvětlení jsou přibližně lineární, disponují velkým dynamickým rozsahem, vysokou kvantovou účinností a nízkým temným proudem. Nevýhodou je teplotní závislost citlivosti diody [2][3][17].

#### Fotonásobiče

Jde o typ fototrubice vyplněné plynem či vakuem. Světlo je absorbováno fotokatódou, kde dochází k vnějšímu fotoelektrickému jevu, přičemž jsou uvolněny elektrony. Ty jsou poté urychlovány napětím mezi elektrodami, zde nazývané dynody, do kterých naráží urychlené elektrony, čímž dojde k emisi dalších, sekundárních elektronů. Tento proces se opakuje přes několik elektrod, pokaždé s vyšším počtem elektronů, až nakonec několikrát zesílený fotoproud dopadne na anodu. Výhodou je schopnost detekovat i jednotlivé fotony, velmi vysoké zesílení  $10^6$  až  $10^8$ , rychlost a rozsah od viditelného světla až po UV záření. Nevýhodou je nutnost rozdílných potenciálů mezi jednotlivými prvky, aby vzniklo potřebné napětí [3].

#### CCD

*Charge-Coupled Device* je jedno či dvourozměrné pole, nejčastěji křemíkových, MOS tranzistorů usazených do jednoho substrátu na malé ploše. Tyto tranzistory, zde nazývané pixely, fungují jako fotodiody. Mezi elektrodou a polovodičem se nachází dielektrikum.

Před použitím jsou pixely nabity na určitou bias hladinu napětí, což vytvoří pod elektrodami vyprázdňenou oblast, nebo-li potenciálovou jámu, hlubokou uměrně k přiloženému napětí a ohraničenou tvarem elektrody. Do této oblasti se po osvětlení nashromáždí páry elektron díra, které proporčně odpovídají intenzitě světla co dopadla na danou elektrodu. Způsob vyčítání funguje jako posuvný registr, kde na

výstupu zesilovač převádí přenesený náboj na napětí, které je poté AD převodníkem transformováno na digitální signál.

Lze použít pro UV, VIS až po blízké IR. Kvantová účinnost až 80 % a linearita na velkém rozsahu. Při chlazení dosahuje nízkého temného proudu a tepelného šumu. Dynamický rozsah je limitován bity AD převodníku a šumem [2][3][21].

## 4.4 Další optické komponenty

### 4.4.1 Optické filtry

Tyto komponenty využívají nejčastěji absorpce či reflexe k odfiltrování nechtěných částí spektra. Jsou konstruovány tak, aby propuštěly pouze záření o vlastnostech důležitých k dané aplikaci, ale ideálně neměnily jeho směr šíření. Jsou to filtry typu pásmová propust, pásmová zadrž, horní propust a dolní propust. Dle principu a účelu jsou děleny na různé kategorie. Zde bude uvedeno jen několik z nich.

#### Absorpční filtry

Tyto filtry jsou vyrobeny většinou ze skla, které může být obalené ve vrstvě materiálu, nebo samotné sklo může být obohaceno o další materiály. Látky, které jsou k těmto filtrům přidávány, mohou být organické i anorganické. Na základě použité příměsi pak filtr absorbuje určité vlnové délky a požadované nechává projít. Jsou použitelné pouze pro aplikace nižších výkonů kvůli vzniku tepla absorpcí. Mohou být použity k absorpci UV záření, IR záření nebo i viditelného záření [3].

#### Dichroické filtry

Využívají tenkých vrstev materiálů o různém indexu lomu, nanesených přes sebe na skleněném podkladu. Mezi vrstvami dochází k interferenci vlnových délek, kde nechtěné vlnové délky jsou odraženy nebo destruktivní interferencí vyrušeny. Proto se také nazývají tenkovrstvé nebo reflektivní. Často jsou využívány jako pásmová propust pro malý rozsah vlnových délek. Rozsah vlnových délek v propustném pásmu je řízen tloušťkou, posloupností a materiálu vrstev. Výhodou je využití při vyšších výkonech záření, jelikož dochází k mnohem menší absorpci energie. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena než filtrů absorpčních [3].

#### Neutrální filtry

Filtry, které mají útlum pro všechny vlnové délky. Mohou být vyrobeny jako absorpční, reflektivní či variabilní. Variabilní filtry mají na jedné straně velký útlum, který může postupně klesat až téměř k nule. Používají se pro snížení optického

výkonu před detektorem, nejčastěji při fotografování. Zatím není možné vytvořit takový filtr, aby měl pro všechny vlnové délky totožný útlum. Jde o jednodušší a levnější komponenty, často realizované jako zatmavené sklo a proto se také alternativně nazývají šedé filtry [3].

### **Polarizační filtry**

Stejně jako neutrální filtry ovlivňují všechny vlnové délky, ale propouští pouze takové záření, které má shodnou polarizaci s jeho směrem polarizace. Zároveň však světlu nepolarizovanému změni polarizaci shodně s jeho vlastní. To znamená, že při analýze zdroje nepolarizovaného záření lze potlačit složky záření, které po odrazu od nějakého povrchu získaly nežádoucí polarizaci [3].

## **4.4.2 Zrcadla**

Mění směr šíření záření odrazem na definovaném rozsahu vlnových délek a úhlů dopadu. Účinnost odrazu bývá typicky alespoň 90 %, přičemž moderní zrcadla dosahují na 99 %. Zrcadla mohou být rovinná, zahnutá konvexně nebo konkávně či jinak [3][18].

### **Metalická zrcadla**

Metalická vrstva je tvořena nejčastěji hliníkem a stříbrem, ale využívá se i zlato, měď, chrom a další. Odrazná vrstva může být nanášena na zadní straně, což bývá případ domácích zrcadel, nebo přední straně skla. Pokovovaná přední strana může být chráněna dalším nátěrem pro zvýšení reflektivity nebo odolnosti povrchu. Bývají širokopásmovější, s menší účinností. Vyrábí se pro UV, VIS i IR regiony spektra [3][18].

### **Dielektrická zrcadla**

Dielektrická zrcadla mají dvě a více tenkých vrstev, které jsou většinou nanášeny na přední straně skla. Tato zrcadla užívají konstruktivní interference mezi vrstvami k odrazu záření. Využití nacházejí zejména při aplikacích s lasery. Obvykle mají užší šířku pásma, ale účinnost i vyšší než 99 % [3][18].



## 5 Návrh měřicího pracoviště

### 5.1 Použité nástroje

#### Programovatelný zdroj RIGOL DP832

Jde o tříkanálový programovatelný zdroj vybavený 3,5 palcovým TFT displejem. Jeho maximální výkon je až 195 W. Tento zdroj bude použit přes USB Host z počítačového pracoviště přes sběrnici USB, přičemž doporučeným softwarem pro jeho ovládání je **Ultra Sigma** od společnosti Rigol. Jeho hlavními výhodami pro tuto aplikaci jsou poměrně vysoká přesnost při nastavování napětí ( $0.05\% + 20\text{ mV}$ ) a proudu ( $0.2\% + 5\text{ mA}$ ) při programování, kvůli náchylnosti diod na přesnost nastavení těchto parametrů. Zdroj je napájen síťovým napájením [22].



Obr. 5.1: Rigol DP832 (převzato z [22])

#### Měřič optického výkonu Vega Ophir

Vega je přístroj určený k měření výkonu a energie světla, především laseru. Je osazen  $320 \times 240$  TFT displejem. Se senzory komunikuje pomocí 15 pinového konektoru, který je umístěn na horní straně přístroje. Vedle tohoto pinu se nachází výstup pro USB či RS232. Vega dokáže přes USB posílat až 500 *points/s* dat o měření energie a dokáže uložit až 10 souborů, které mají v součtu až 250000 bodů dat ve své paměti. Pro zpracování dat na počítači z dat přijatých přes USB sběrnici je určen software **StarLab**, který je volně ke stažení od výrobce Ophir [24].

#### Fotodioda PD300

Tato fotodioda bude připojena pomocí kabelu k měřiči Vega Ophir. PD300 disponuje clonou o velikosti  $10 \times 10\text{ mm}$  a dokáže snímat spektrum světla na intervalu

350 ÷ 1100 nm bez nasazeného filtru, 430 ÷ 1100 nm s nasazeným filtrem. Světelné výkony měří na intervalu 500 pW ÷ 30 mW, respektive 200 μW ÷ 300 mW [24].



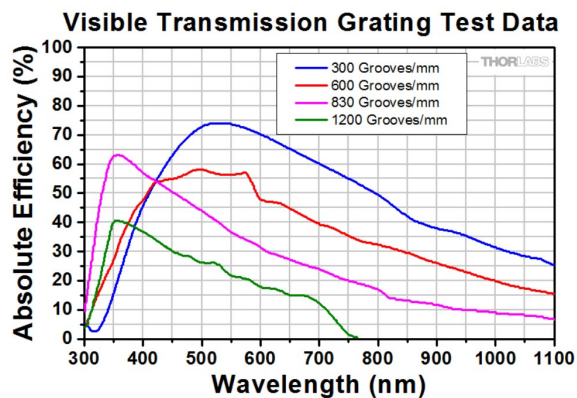
Obr. 5.2: (a) Vega Ophir [24] (b) Fotodioda PD300 [24]

### Transmisní mřížka GT25-06V

Mřížka určená k funkci ve viditelném spektru od společnosti THORLABS [18]. Hustota vrypů je  $N = 600 \frac{\text{lines}}{\text{mm}}$ , její tloušťka je 3 mm a materiál použitý na substrát je Schott B270. Vzdálenost mezi sousedními vrypů  $a$  se určí pomocí následujícího výpočtu:

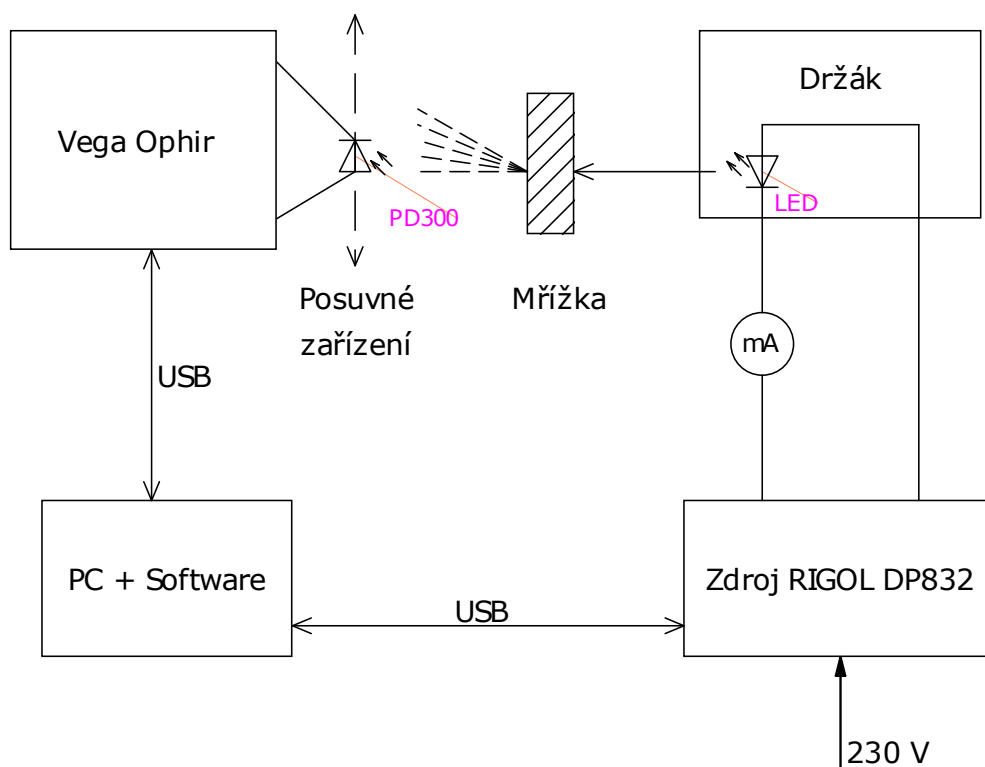
$$N = 600 \frac{\text{lines}}{\text{mm}} = 600000 \frac{\text{lines}}{\text{m}} \Rightarrow a = \frac{1}{N} \text{m} = \frac{1}{600000} = 1.666 \mu\text{m} \quad (5.1)$$

Účinnost v závislosti na vlnové délce podle výrobce lze najít v následujícím grafu jako červenou křivku.



Obr. 5.3: Mřížky prodávané Thorlabs (převzato z [18])

## 5.2 Schéma zapojení



Obr. 5.4: Schéma zapojení pracoviště

## 6 Realizace pracoviště

### 6.1 Příklad výpočtu vhodného umístění fotodiody

Pro tento výpočet je nejdříve nutné vypočítat pod jakým úhlem se budou lámat krajní vlnové délky viditelného světla. Vyjádření plyne ze vztahu uvedeného v (4.3). Příklad výpočtu pro  $\lambda = 380$  nm, maximum prvního řádu  $m = 1$ , mřížková konstanta  $a = 1.666$   $\mu\text{m}$  a při zdroji světla směřovaném kolmo k mřížce bude  $\sin(\theta_i) = 0$ .

$$a [\sin(\theta_{380}) - \sin(\theta_i)] = m\lambda \Rightarrow \sin(\theta_{380}) = \frac{m\lambda}{a} \Rightarrow \theta_{380} = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{a}\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot 380 \cdot 10^{-9}}{1,666 \cdot 10^{-6}}\right) = 13.179^\circ \quad (6.1)$$

Stejným způsobem se zjistí, pod jakým úhlem se bude lámat druhá krajní vlnová délka, tedy  $\lambda = 780$  nm.

$$\theta_{780} = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{a}\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot 780 \cdot 10^{-9}}{1,666 \cdot 10^{-6}}\right) = 27.905^\circ \quad (6.2)$$

Pro tuto aplikaci byl v laboratoři dostupný pojezd s maximální délkou posuvu 58 mm. Kvůli tomuto omezení bude vhodné rozprostřít spektrum například na délce  $d = 50$  mm. Vzdálenost  $x$  od difrakční mřížky, aby se na ploše pozorované roviny rozprostřelo spektrum na délce  $d$  se určí:

$$x = \frac{d}{\tan(\theta_{780}) - \tan(\theta_{380})} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\tan(27,905) - \tan(13,179)} = 169.25 \text{ mm} \quad (6.3)$$

Vzdálenost paprsku o  $\lambda = 380$  nm od středové osy:

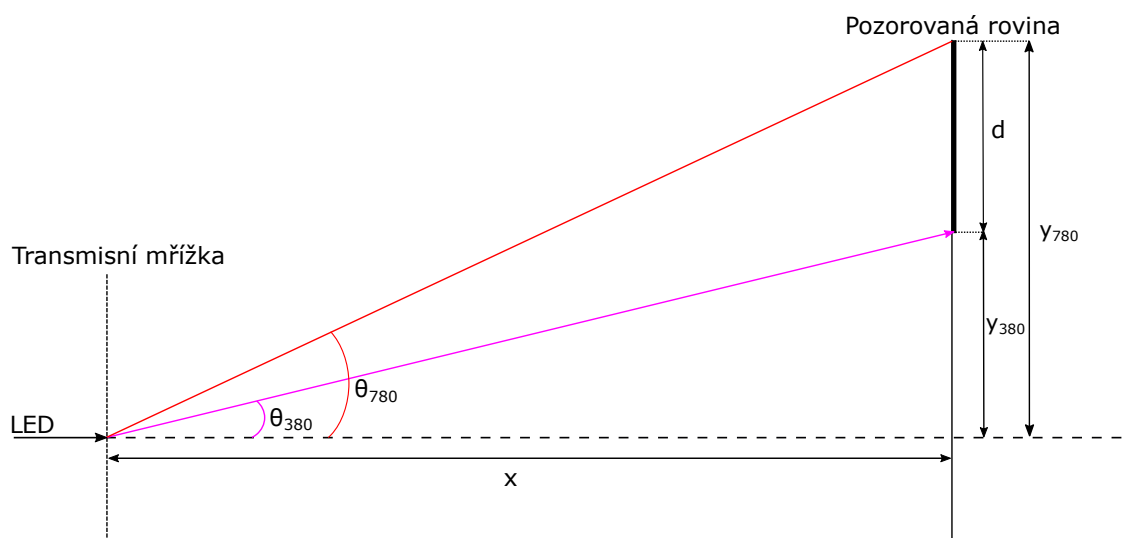
$$y_{380} = b \cdot \tan(\theta_{380}) = 169,25 \cdot 10^{-3} \cdot \tan(13,179) = 39.63 \text{ mm} \quad (6.4)$$

Vzdálenost od středové osy pro paprsek  $\lambda = 780$  nm pak bude:

$$y_{780} = y_{380} + d = 39,63 \cdot 10^{-3} + 50 \cdot 10^{-3} = 89.63 \text{ mm} \quad (6.5)$$

Celé viditelné spektrum se rozkládá mezi  $\lambda_{380}$  a  $\lambda_{780}$ , tedy na 400 nm. Pro tento konkrétní případ vychází změna vlnové délky na každém milimetru o  $\Delta\lambda$ :

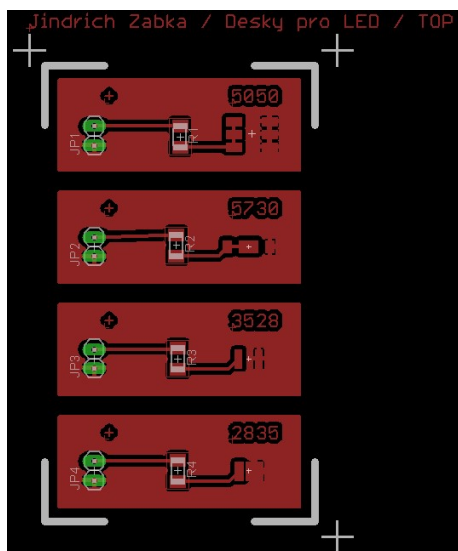
$$\Delta\lambda = \frac{400}{50} = 8 \text{ nm} \quad (6.6)$$



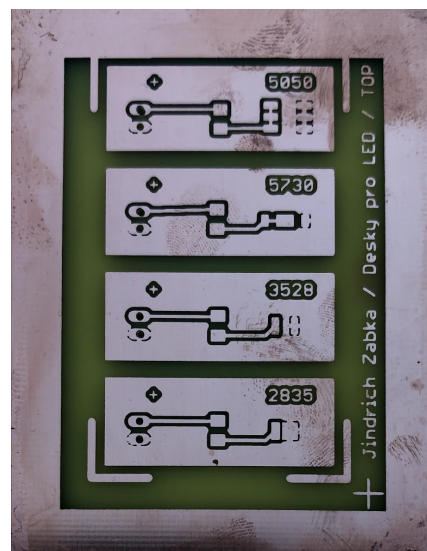
Obr. 6.1: Nákres pro výpočet vzdáleností na pracovišti (nakresleno v Inkscape)

## 6.2 Desky plošných spojů pro LED

Pro oživení diod byly navrženy 4 malé desky v prostředí programu EAGLE 7.2.0. Každé LED byla vytvořena knihovna s pouzdrem podle doporučeného vzoru pro pájení od výrobce. Dále má každé pouzdro předřazený ochranný rezistor, který do určité míry dokáže ochránit před přepětím.



(a)

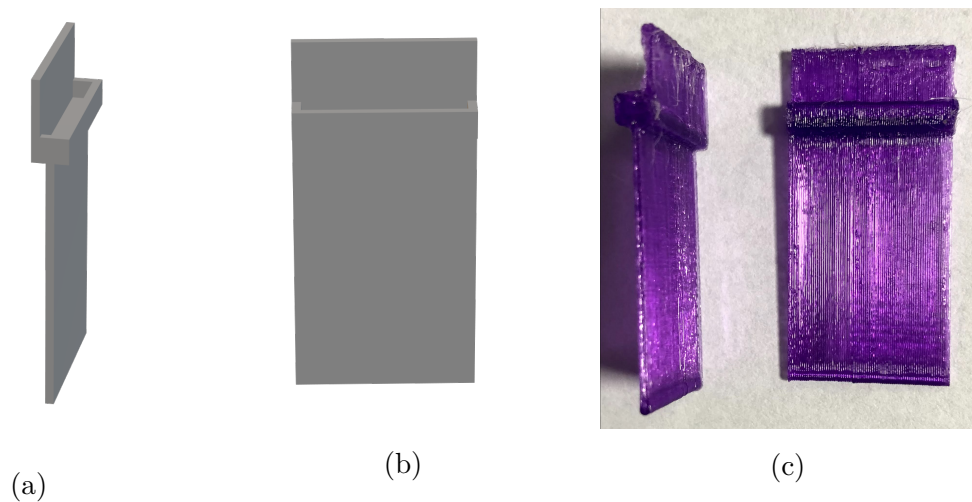


(b)

Obr. 6.2: (a) Schéma desky (b) Deska

K upevnění do držáku bylo kvůli malým rozměrům potřeba navrhnout jiný způsob uchycení desek než napřímo. Z toho důvodu byly navrženy ve volně stáhnutelném

programu Tinkercad a vytisknuty na 3D tiskárně jednoduché násady, díky kterým lze desky upevnit do držáku, který je k dispozici v laboratoři, vždy do stejné polohy pro všechny desky.



Obr. 6.3: (a)(b) Náhledy na 3D objekt (c) Reálný objekt

## 6.3 Prostředí NI LabVIEW

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) je platforma využívající vizuální programovací jazyk zvaný “G”, vytvořený společností National Instruments a využívaný k ovládání a testování pracovišť s různými přístroji. Hlavní částí platformy je LabVIEW VI, kde **Front Panel** zobrazuje uživatelské rozhraní ve kterém je možné vkládat údaje k měření, extrahovat naměřená data, vykreslovat grafy a další. Veškeré objekty umístěné v tomto panelu se automaticky objeví i v diagramu. Druhou částí je **Block Diagram**, který je přímo spojen s uživatelským rozhraním. V tomto diagramu je programováno pomocí jazyka G, který je v podobě bloků. O chodu programu rozhoduje posloupnost zapojených bloků. Verze programu užitého na pracovišti je z roku 2020 s licencí nabízenou VUT.

### 6.3.1 SCPI standard

S napájecím zdrojem RIGOL program komunikuje pomocí zapisování a vyčítání string příkazů standardu SCPI, které jsou směřovány k tomuto přístroji pomocí VISA Resource Name specifického pro daný přístroj. VISA Resource Name napájecího zdroje byl zjištěn pomocí aplikace NI MAX. MAX (*Measurement & Automation*

*Explorer*) je samostatná aplikace, která je nedílnou součástí instalace LabVIEW. Seznam příkazů, které je s tímto zdrojem možné použít, je k nalezení v download sekci zde [22]. SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*) je založen na standardu IEEE 488.2 a jeho cílem je sjednocení a zjednodušení příkazů pro komunikaci s přístroji po různých typech sběrnice. SCPI zaručuje, že přístroje stejného typu od různých výrobců mají pro totožné funkce stejné příkazy, čímž se zlepšuje přenositelnost programů a čas jejich vývoje. Příkazy vychází z angličtiny a jejich zápis má na první pohled popsat, kterou funkci má příkaz vykonat. V návodech jsou tyto příkazy psány velkými a malými písmeny, přičemž část psaná velkými znaky je povinná. V zápisu se mohou také objevit hranaté závorky, kde jsou volitelné parametry. Jako příklad lze použít nastavení proudu na užitém zdroji, kde celková syntax je: `[:SOURce[<n>]]:CURRent[:LEVel][:IMMediate][:AMPLitude]`, přičemž pokud chceme nastavit na jediném připojeném zdroji 60 mA, provedeme to následovně: `:CURR 0.06` [25].

### 6.3.2 OphirLMMeasurement

Přístroj Vega je ovládán pomocí knihovny OphirLMMeasurement.dll od výrobce Ophir. Tato knihovna umožňuje komunikovat s přístrojem jako s COM objektem přes USB. K registraci COM objektu je potřeba nainstalovat zdarma dostupný program StarLab od výrobce, který tuto akci provede jako součást instalace. Poté se tento soubor .dll přiřadí do projektu, čímž se automaticky objeví v projektu. V samotném diagramu se volají metody třídy z knihovny pomocí vyvolávacího uzlu z nabídky ActiveX. Jednotlivé třídy vyvolávání jsou propojené pomocí reference na ActiveX objekt a device handler, tedy virtuální reprezentaci fyzického přístroje. Veškeré funkce lze také zapsat přístroji pomocí write metody, po které musí vždy následovat metoda read. Přehled a jejich popis je uveden v souboru OphirLMMeasurement COM Object.doc. Pro ovládání pomocí write a read jsou příkazy ve formě stringů vypsané v souboru Ophir User Commands.pdf. Oba textové soubory jsou zahrnuty při instalaci StarLab [24].

### 6.3.3 Uživatelské rozhraní

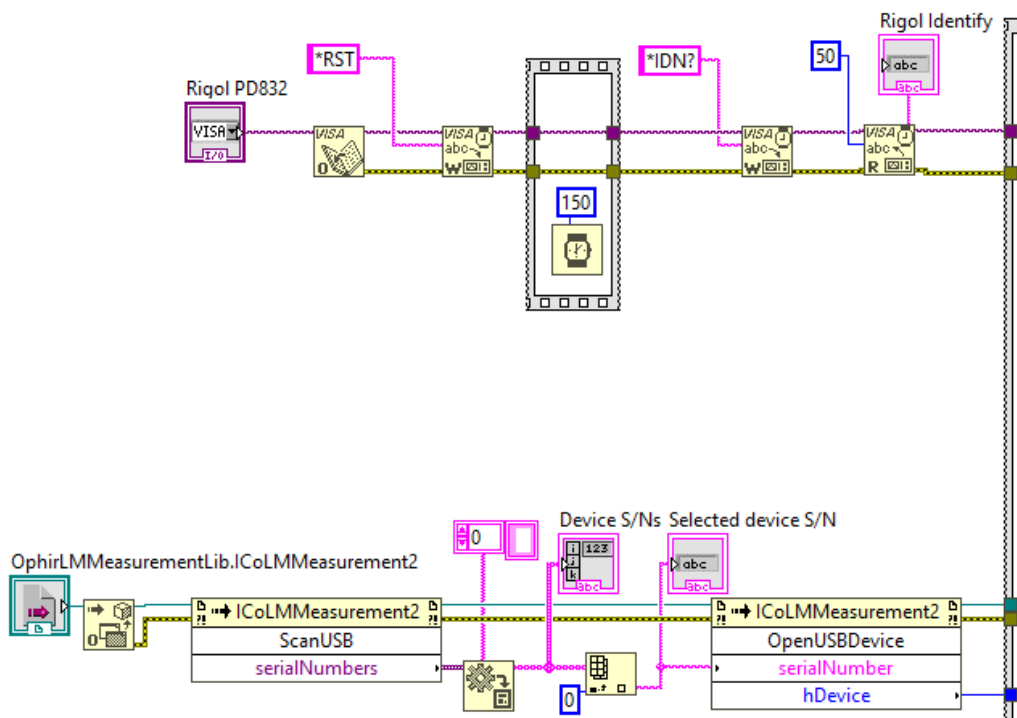
Uživatelská aplikace v LabVIEW se skládá ze tří částí. V levé horní části oddělené čarou se nachází indikátory navázání komunikace s přístroji. Pod čarou je oddíl, kde uživatel vybírá, kterou LED chce měřit, jak moc rozprostřené spektrum chce měřit, nastavuje napětí a proud napájecímu zdroji. V pravé části je graf, který automaticky zapisuje naměřené hodnoty s každým krokem programu.

## 6.3.4 Důležité části blokového diagramu

### Navázání komunikace s přístroji

V levé horní části je VISA Resource Name, do kterého se v uživatelském rozhraní vepíše příslušný string z NI MAX, otevření komunikace a přístroj je restartován do továrního nastavení. Po vyčkání 150 ms je poté dotázán na identifikaci, která je vypsána do uživatelského rozhraní.

V dolní větvi funkce Automation Open získá z přiřazené knihovny automation reference number, nebo-li refnum. Na základě tohoto čísla program otevře referenci na ActiveX Object a metodou ScanUSB vyhledá na základě reference zařízení od značky Ophir. ScanUSB má na výstupu datový typ variant. O jaký datový typ jde uvnitř variant je specifikováno v referenci. Tato data jsou tedy přeložena do stringů a vypsány do Device S/Ns. V tomto případě se počítá pouze s přístrojem Vega, je tedy automaticky programem vybrán a je s ním otevřena komunikace.

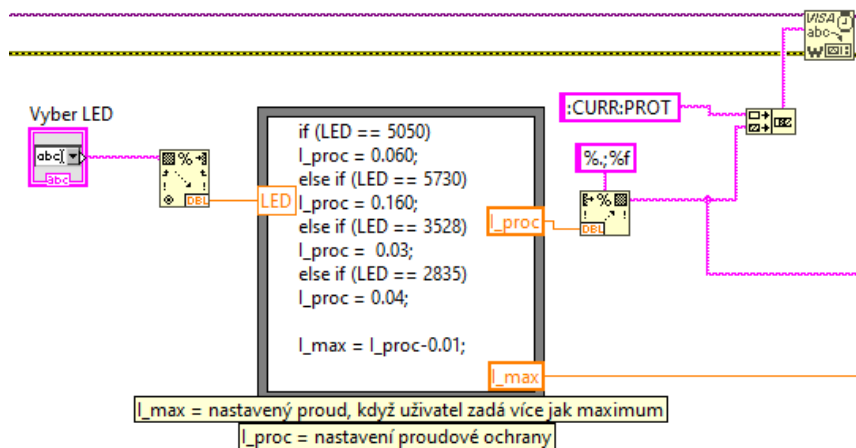


Obr. 6.4: Navázání komunikace

### Výběr LED a nastavení proudové ochrany

Po spuštění programu uživatel vybere z nabídky LED. Na základě výběru se na zdroji nastaví proudová ochrana pomocí proměnné I\_proc na hodnotu mírně vyšší, než maximální provozní proud. Ochrana je nastavena na nižší hodnotu, než je peak hodnota uvedená výrobcem, z důvodu vyšší ochrany.

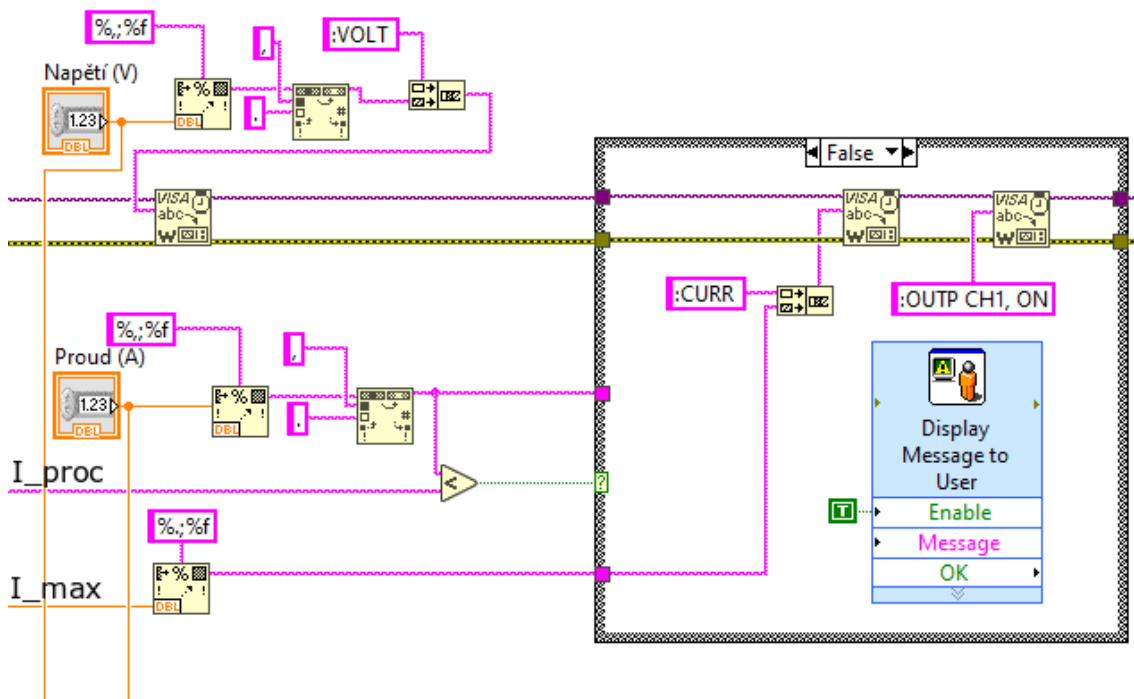




Obr. 6.5: Výběr LED

### Nastavení hodnot proudu a napětí a ochrana proti uživatelské chybě

Hodnoty napětí a proudu, které může uživatel zapsat v jeho rozhraní, jsou s desetinnou čárkou. Jelikož syntax napájecího zdroje požaduje desetinnou tečku, je potřeba čárku nahradit pomocí metody Search and Replace String a hodnotu poté složit pomocí Concatenate String s SCPI příkazem pro nastavení hodnot.



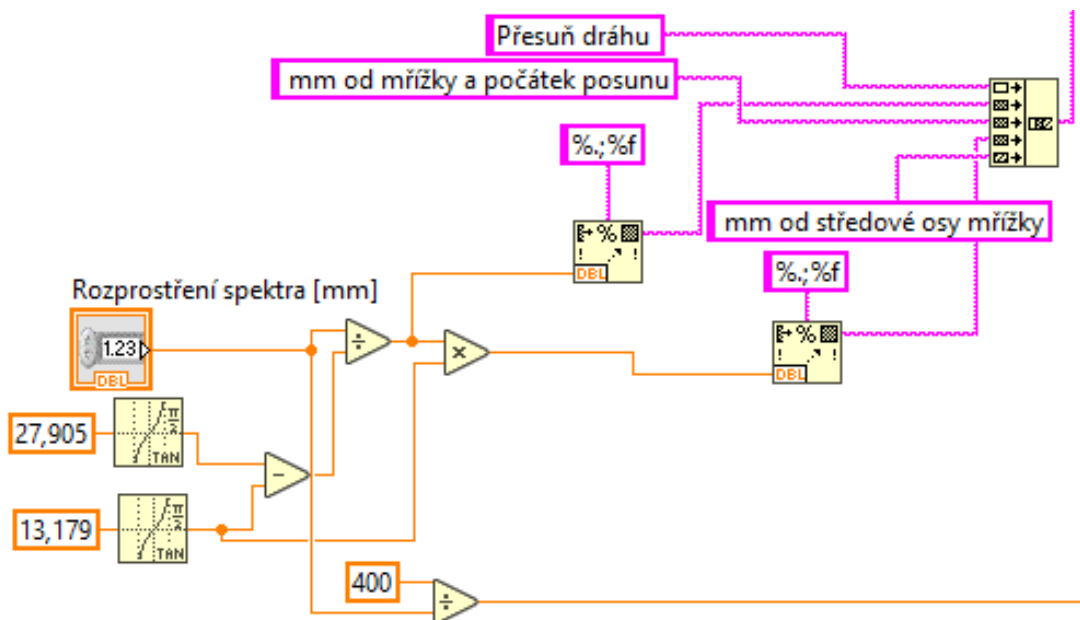
Obr. 6.6: Nastavení hodnot napájecího zdroje

Všechny využití LED mají maximální hodnotu provozního napětí do 3.4 V. Z toho důvodu bylo numerické řízení pro uživatele omezeno shora na maximální hodnotu 3.35 V a přepětová ochrana nastavena na 3.4 V.

Pokud uživatel vybere číslo pouzdra, ale zadá vyšší než přípustný proud dané diody, bude mu po spuštění programu zobrazena výstražná zpráva o překročení proudu a zároveň se automaticky nastaví proud  $I_{max}$ . Pokud uživatel nastaví nulový proud nebo napětí, rozsvítí se červená dioda s názvem Chyba.

## Rozprostření spektra

Po výběru z nabídky bude uživateli zobrazena zpráva s instrukcemi, jak má nastavit pracoviště. Hodnoty zobrazené uživateli vychází z 6.1. Hodnota delta udává, o kolik nm se záření změní na pozorované rovině na 1 mm. S touto hodnotou se poté vykresluje graf.

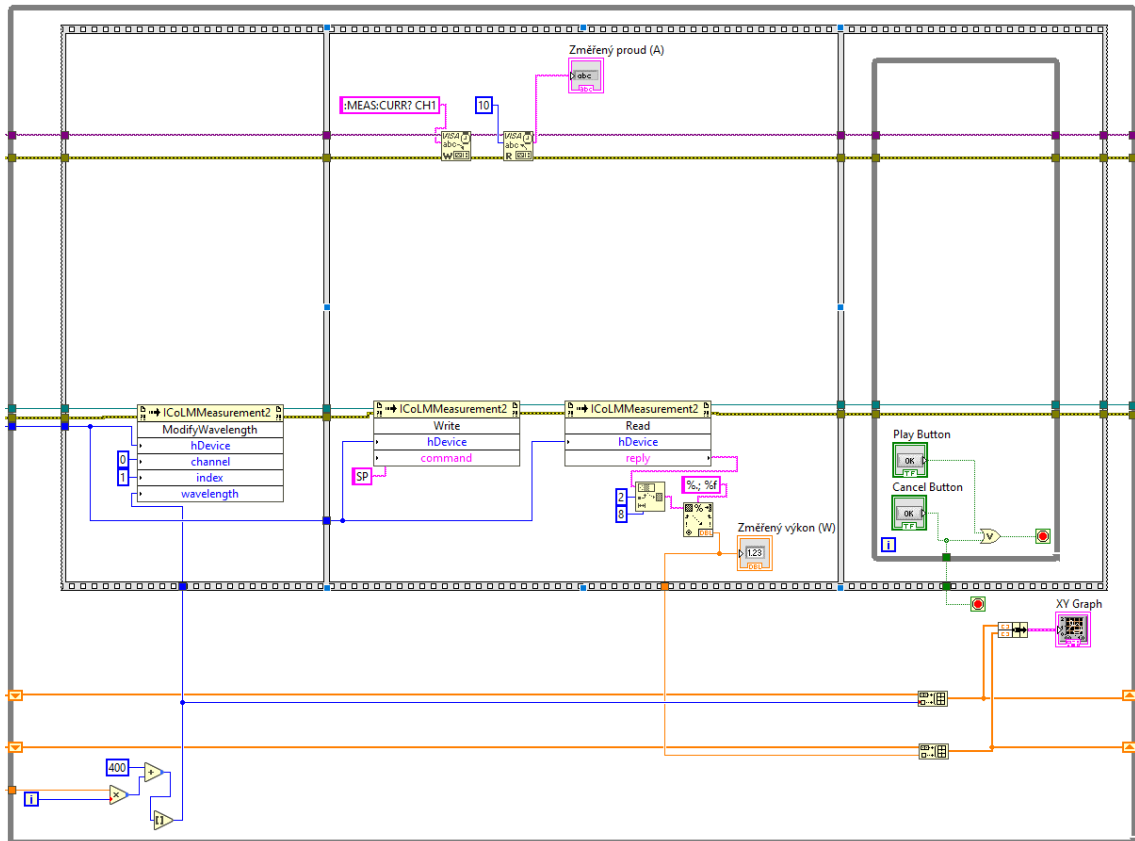


Obr. 6.7: Nastavení kroku grafu

## Měřicí smyčka

Smyčka je utvořena jako while cyklus, s vnořenou Flat Sequence Structure a dalším while cyklem. V největším while cyklu se s každým krokem vypočítává hodnota na kterou se Vega přenastaví na začátku dalšího měřicího cyklu. V sekvenční struktuře se jako první krok přenastaví na daném indexu citlivost senzoru na vlnovou délku danou iterací vnějšího while cyklu a rozprostření spektra. V druhém kroku je poslán metodou write příkaz **SP** a pomocí reply vyčten string ve tvaru “\* 1.000E-1”, oříznut

o první dva znaky a vypsán do grafu. Zároveň je svorkami napájecího zdroje měřen proud a indikován v uživatelském rozhraní. Graf funguje na principu shift registru a generuje se s každou iterací vnějšího while cyklu. Ve třetím kroku program čeká, pokud chce uživatel měřit další iteraci nebo program ukončit.



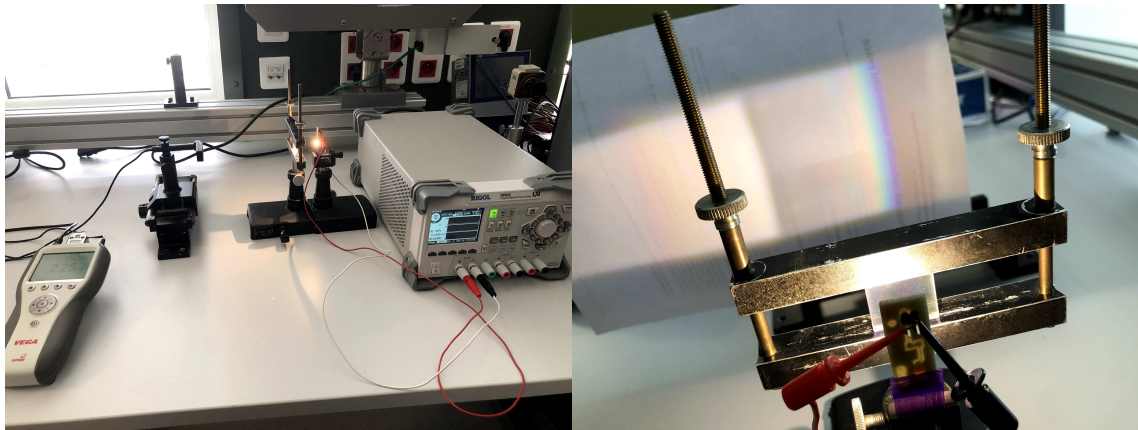
Obr. 6.8: Nastavení kroku grafu

## 6.4 Sestavené pracoviště

Na obrázku 6.9a vpravo je vidět napájecí zdroj, který má připojené svorky na DPS v držáku. V dalším držáku je osazena difrakční mřížka GT25-06V. Nalevo leží posuvná kolejnice s připevněnou fotodiodou PD300 a připojenou k Ophir Vega. Z důvodu přehlednosti není na ilustračním obrázku vidět připojený počítač. Na druhém ilustračním obrázku je vidět rozklad světla přes mřížku na papír. V levé části lze slabě vidět další difrakční maximum.

## 6.5 Postup měření

Měření v programu se odehrává v následujících krocích:



(a)

(b)

Obr. 6.9: (a) Pracoviště (b) Rozklad světla na mřížce

1. Upevněte DPS s osazenou LED do násady v držáku a připojte svorky, polarita je naznačena na desce
2. Po spuštění programu LedMeasure.exe vyberte číslo LED, které je napsané na desce, vyberte si, jak široce rozprostřené spektrum chcete měřit. Nastavte požadované napětí a proud.
3. Stiskněte tlačítko Spustit.
4. Předělejte uspořádání pracoviště podle 6.1 a zobrazené zprávy. Po odkliknutí OK se okamžitě změří první hodnota.
5. Posuňte posuv o 1 mm a zmáčkněte tlačítko Další krok. Pokračujte než dosáhnete na grafu  $\lambda = 780 \text{ nm}$
6. Pravým tlačítkem myši klikněte na graf, zvolte Export Data To Excel a Export Simplified Image...
7. Opakujte pro všechny DPS

## 6.6 Naměřené hodnoty

Grafy (a) a (b) vychází z dat exportovaných do Microsoft Excel z prostředí programu a byly zpracovány v MATLAB. Na grafech (a) se nachází závislost intenzity ozáření (1.3) na  $\lambda$ , na grafech (b) závislost normované svítivosti na  $\lambda$ . Modrou barvou graf z výpisu níže a červenou funkce zobrazená na Obr. 1.4.

## Tvoření grafu světelné účinnosti v grafu

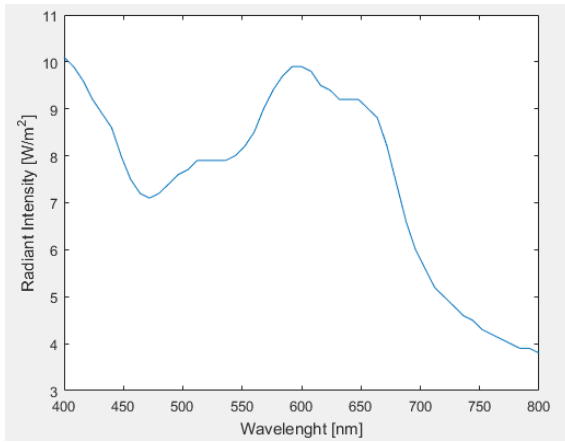
```
l = 169.25e-3;          % Vzdálenost počátku kolejnice
r = zeros(1, 51);
r(1) = l;
Km = 683;              % Maximální světelná účinnost

lam = [400 408 416 424 432 440 448 456 464 472 480 488 496 504 ...
       744 752 760 768 776 784 792 800]; % Vlnové délky
P = VarName1';        % Změřený optický výkon

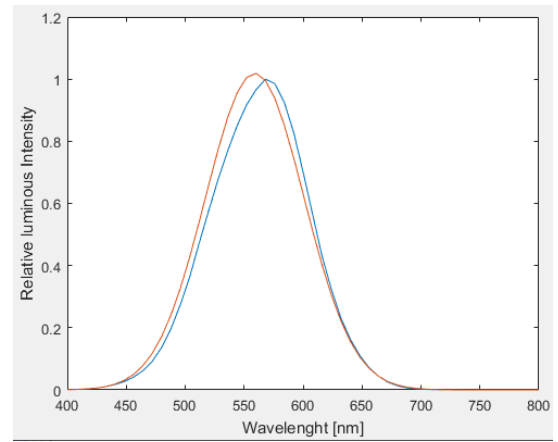
for i = 1:50
    uhel = atan((i/1000)/l);
    r(i+1) = l/cos(uhel);
end

sr = (0.01*0.01)./(r.^2); % Prostorový úhel
V = 1.019*exp(-285.4*(((lam/1000)-0.559).^2));
    % Světelná účinnost
Ie = (P./sr);          % Zářivost
I = (Ie*Km).*V;        % Výpočet svítivosti
Ie_rel = I./max(I);    % Normování k 1

figure(2)
plot(lam, Ie_rel);
hold on;
plot(lam, V);
```

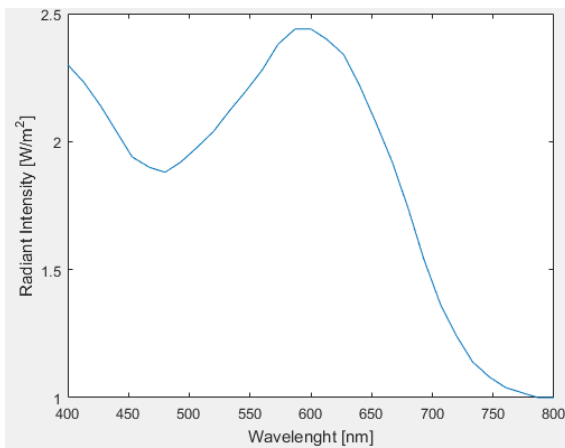


(a) Závislost  $E_E$  na  $\lambda$

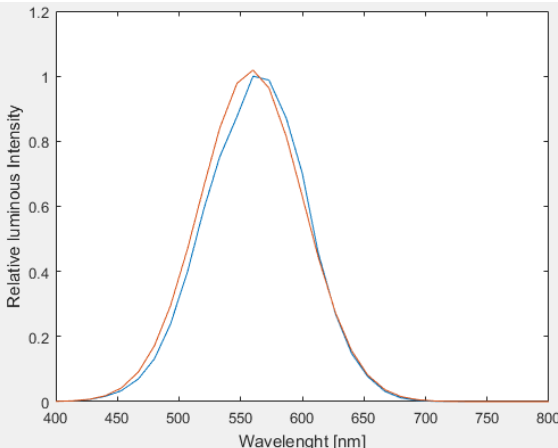


(b) Normovaná svítivost v závislosti na  $\lambda$

Obr. 6.10: Závislosti pro pouzdro 5730

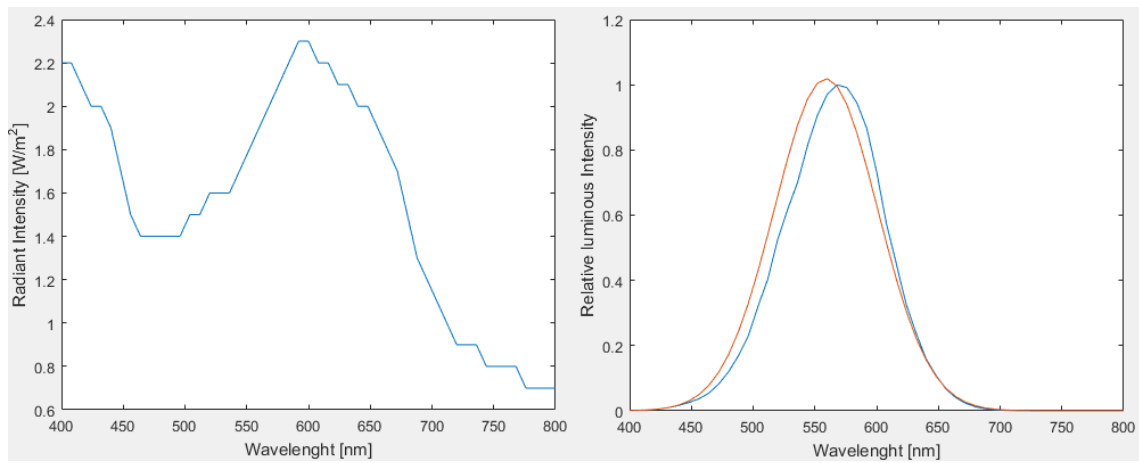


(a) Závislost  $E_E$  na  $\lambda$



(b) Normovaná svítivost v závislosti na  $\lambda$

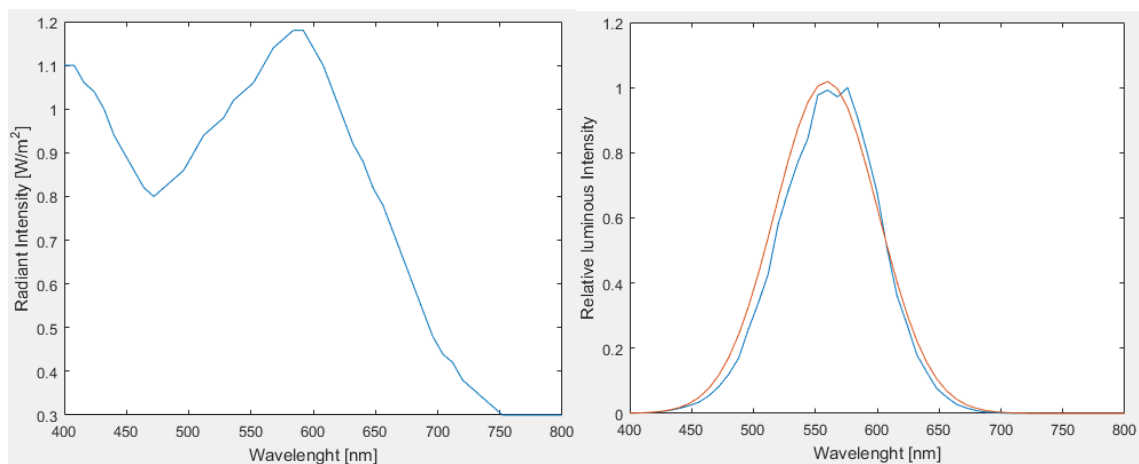
Obr. 6.11: Závislosti pro pouzdro 5050



(a) Závislost  $E_E$  na  $\lambda$

(b) Normovaná svítivost v závislosti na  $\lambda$

Obr. 6.12: Závislosti pro pouzdro 2835



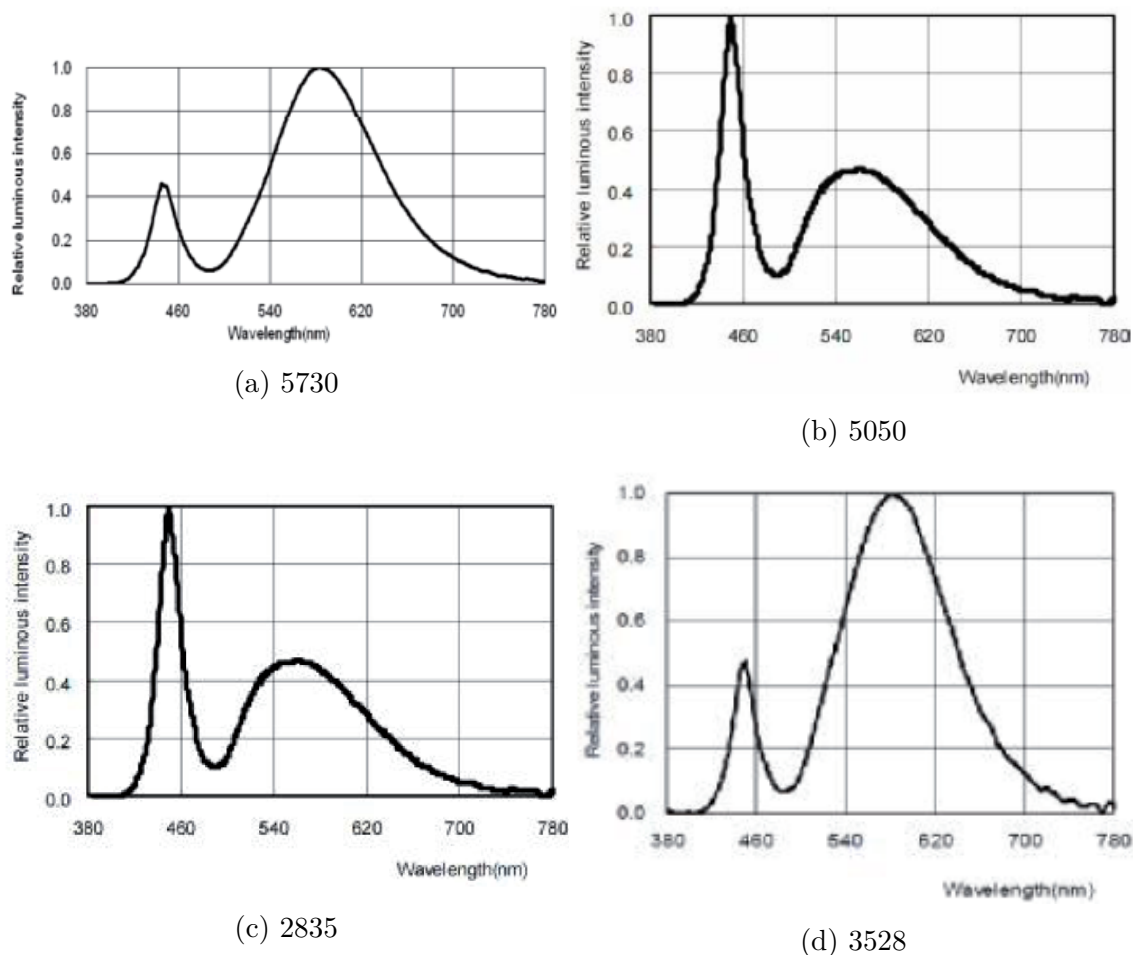
(a) Závislost  $E_E$  na  $\lambda$

(b) Normovaná svítivost v závislosti na  $\lambda$

Obr. 6.13: Závislosti pro pouzdro 3528

## 7 Porovnání s katalogovými listy

Výrobce udává v katalogových listech křivky závislosti poměrné světelné intenzity na vlnové délce od 380 do 780 nm.



Obr. 7.1: Referenční měření z katalogových listů [15]

Přístroj Ophir Vega s fotodiodou PD300 i přes údaje v katalogovém listu podporoval při ovládání přes USB spektrální rozsah pouze na  $400 \div 1100$  nm, tudíž prvních 20 nm se nepodařilo naměřit. Naměřené průběhy se závislostí intenzity ozáření na vlnové délce se tvarově poměrně shodují s předlohou. Při pohledu na závislosti poměrné světelné intenzity se však grafy neshodují.



## Závěr

V teoretické části se čtenář seznámil se vztahem mezi fotometrickými a radiometrickými veličinami. V dalších částech navazovaly informace k LED a byly zakoupeny 4 různá pouzdra, každé s odlišnými technickými parametry. Pro návrh pracoviště byla vybrána transmisní difrakční mřížka GT25-06V s 600 vrypů na milimetr. Důvodem byl vysoký počet vrypů na milimetr pro širší rozprostření spektra a její přizpůsobení k funkci ve viditelném spektru.

Při návrhu bylo opuštěno od multimetru UNI-T UT803, jelikož od výrobce nejsou k dispozici jakékoli funkční drivery pro ovládání přístroje přes USB či RS232. Jeho funkci tak zastoupil napájecí zdroj RIGOL DP832, který má implementovanou funkci MEASure: schopnou změřit tekoucí proud, napětí a výkon na sepnutých svorkách. Posuvná dráha, na které je umístěna fotodioda, byla vypůjčena z optické laboratoře, ale nebyla zprovozněna automatizovaně a musí se tedy posouvat manuálně. Software k pracovišti byl vytvořen v prostředí LabVIEW, který s přístroji komunikuje přes sběrnici USB. Byla vytvořena spustitelná aplikace LedMeasure.exe, která umí po spuštění automaticky navázat spojení s přístroji. Při zadávání parametrů jsou ošetřeny vstupy proti uživatelským chybám. Po zadání všech hodnot je uživatel vyzván k rekonfiguraci měřicího stanoviště na základě vybrané šířky rozprostření spektra. Jelikož posuvné zařízení, které bylo k dispozici, má dráhu posuvu pouze 5.8 cm, byla na toto omezení aplikace uzpůsobena. Pravou část uživatelské aplikace zabírá graf, který se generuje s každým krokem programu.

Pro upevnění LED byly navrženy jednoduché desky plošných spojů a násady vytisknuté na 3D tiskárně, které umožňují upevnění do laboratorního držáku.

Při měření na pracovišti se zjistilo, že přístroj Vega Ophir s danou fotodiódou nepodporuje měření vlnových délek pro vlnové délky pod 400 nm navzdory opačnému tvrzení uživatelského manuálu. Měření bylo také zatíženo velkou chybou metody. Pro toto měření by byl vhodnější menší detektor, jelikož při měření jsou hodnoty zatěžovány vedlejšími nechtěnými hodnotami. Zároveň by byl vhodnější delší posuv, aby bylo možné proměřit více rozprostřené spektrum. Pro tento případ bychom však museli zvážit užití jednotlivých diod, protože při měření s nejstarším pouzdrém LED 3528 byl jeho optický výkon místy téměř na hranici šumu.

# Literatura

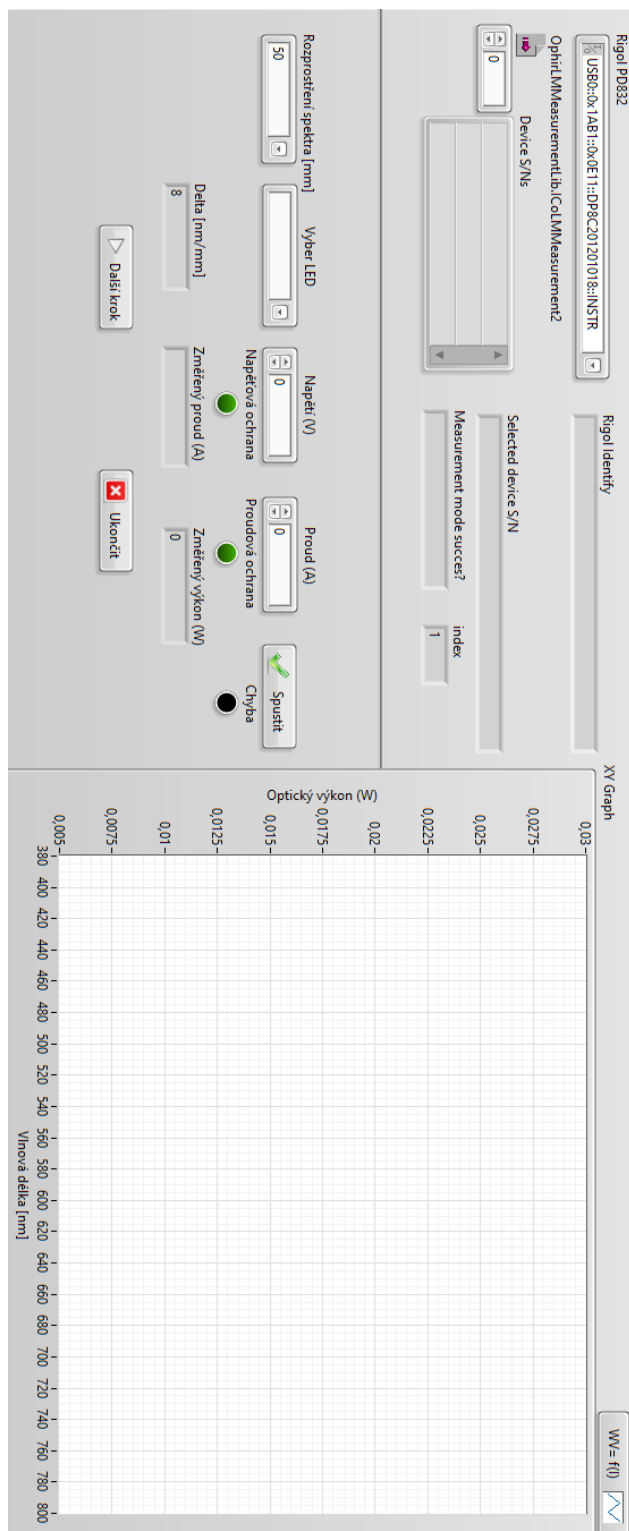
- [1] HABEL, J. *Světlo a osvětlování*. 1. vydání. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [2] BOUŠEK, KOSINA A MOJROVÁ *Elektronické součástky*. Brno: Skriptum VUT, 2015.
- [3] *RP Photonics* [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <<https://www.rp-photonics.com/>>.
- [4] WILFERT, O. *Optoelektronika*. Brno: PC-DIR, 1993. Učební texty vysokých škol. ISBN 8021405511.
- [5] SOKANSKÝ, K., NOVÁK, T., BÁLSKÝ, M., BLÁHA, Z., CARBOL, Z., DIVIŠ, D., SOCHA, B., ŠNOBL, J., ŠUMPICH, J., ZÁVADA, P. *Světelná technika* [online]. Praha: ČVUT, 2011, 256s. Dostupné z: <<https://www.mpo-efekt.cz/dokument/CVUT-6-Svetelna.pdf>>.
- [6] *Radiometry and Photometry* [online]. Dostupné z: <<https://depts.washington.edu/mictech/optics/me557/Radiometry.pdf>>.
- [7] DOLEŽAL, P. *Příčiny poruch a selhání LED při provozu* Brno: Bakalářská práce. VUT v Brně FEKT, 2015.52s.
- [8] JANÍK, D. *Provozní parametry LED světelných zdrojů* Brno: Diplomová práce. VUT v Brně FEKT, 2017. 63s.
- [9] REICHL, J. a VŠETIČKA, M. *Fotometrické veličiny* [online]. 2006 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>>.
- [10] *Color Rendering Index* [online]. edit. 2019 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <<https://www.waveformlighting.com/tech/what-is-cri-color-rendering-index>>.
- [11] *Wikipedia - LED* [online]. edit. 2019 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <<https://cs.wikipedia.org/wiki/LED>>.
- [12] *COB and SMD* [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <<https://www.solarlightsmanufacturer.com/cob-led-smd-led/>>.
- [13] RICE, CH. *What are COB LEDs* [online]. 2017 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <<https://siliconlightworks.com/resoures/what-are-cob-leds>>.

- [14] *Typy SMD čipů* [online]. [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <<https://www.smdledzarovky.cz/nas.radce/typy.smd.cipu.2835.3014.5630.5050.3528.cob>>.
- [15] *GM Electronic* [online]. Dostupné z: <<https://www.gme.cz/>>.
- [16] ČERNOCH, A., MACHULKA, R. a SOUBUSTA, J. *Optická spektroskopie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3114-7.
- [17] *Spektroskopické metody* [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <<https://is.muni.cz/el/1431/podzim2013/F6530/um/SpektroskopickeMetodyHardware.pdf>>.
- [18] *THORLABS* [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <<https://www.thorlabs.com/>>.
- [19] *Spectrometer* [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical\\_Chemistry/Supplemental\\_Modules\\_\(Analytical\\_Chemistry\)/Instrumental\\_Analysis/Spectrometer](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Supplemental_Modules_(Analytical_Chemistry)/Instrumental_Analysis/Spectrometer)>.
- [20] HOLLAS, J. Michael. *Modern spectroscopy*. 4th ed. Chichester: John Wiley, 2004. ISBN 0470844167.
- [21] *Charge-Coupled Devices* [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <<https://www.microscopyu.com/digital-imaging/introduction-to-charge-coupled-devices-ccds>>.
- [22] *Batronix Rigol DP832* [online]. <<https://www.batronix.com/shop/power-supplies/DP832.html>>.
- [23] UNI-T *UNI-T UT803 Operating manual* [online]. 2004 [cit. 2019-12-15]. 58s. Dostupné z: <<http://www.ageta.hu/pdf/UT803.pdf>>.
- [24] OPHIR *Ophir Photonics* [online]. 2019 [cit. 2019-12-15]. 277s. Dostupné z: <[https://www.ophiropt.com/laser--measurement/sites/default/files/laser\\_measurement\\_instruments\\_catalog.pdf](https://www.ophiropt.com/laser--measurement/sites/default/files/laser_measurement_instruments_catalog.pdf)>.
- [25] DŘÍNOVSKÝ, J. *Radioelektronická měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012. ISBN 978-80-214-4495-9.

# Seznam příloh

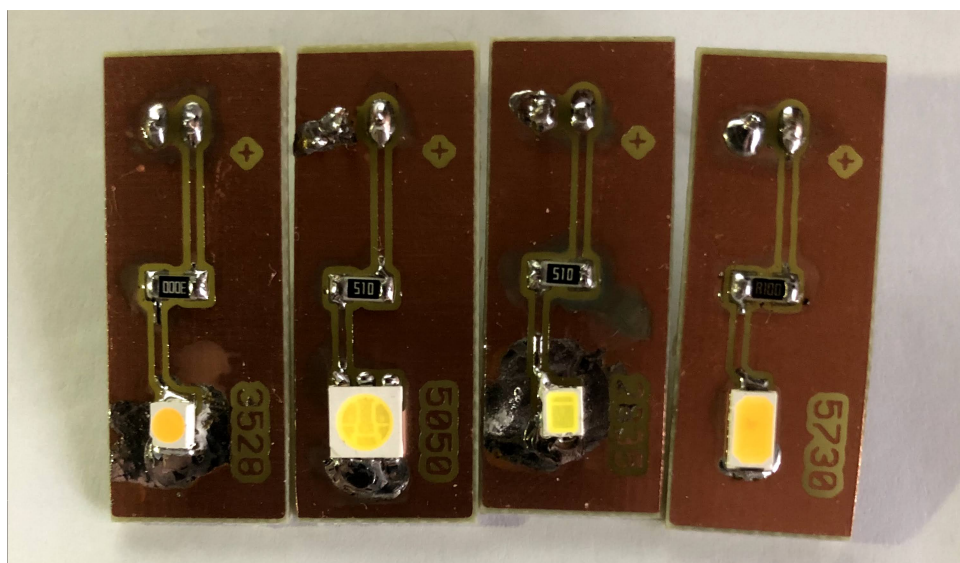
<b>A</b>	<b>Uživatelské rozhraní aplikace</b>	<b>52</b>
<b>B</b>	<b>Osazené DPS a seznam součástí</b>	<b>53</b>
B.1	Seznam součástí . . . . .	53
<b>C</b>	<b>Obsah přiloženého ZIP souboru</b>	<b>54</b>

# A Uživatelské rozhraní aplikace



Obr. A.1: GUI

## B Osazené DPS a seznam součástek



Obr. B.1: Osazené desky plošných spojů

### B.1 Seznam součástek

Součástka	Označení	Součástka	Označení
SMD LED 5050	GT-M50503W522-0B	SMD Rezistor 1206	R1206 0R
SMD LED 5730	GT-M57301W355-0	SMD Rezistor 1206	R1206 300R 1%
SMD LED 3528	GT-M35281W308-0	SMD Rezistor 1206	R1206 51R 5%
SMD LED 2835	GT-M28351W522-0	Pin Header 1x2	

## C Obsah přiloženého ZIP souboru

```
/.....kořenový adresář ZIP archivu
├── GUI ..... soubory projektu, LabVIEW 20.0.1
│   ├── OphirLMMeasurement.dll .....Knihovna pro ovládání Ophir Vega
│   ├── Measuringprocess.lvproj
│   ├── Measuringprocess.lvlps
│   ├── Measuringprocess.aliases
│   ├── LED Measure.vi
│   ├── LedMeasure.ini
│   └── LedMeasure.exe
├── navrh DPS.....Desky plošného spoje, EAGLE 7.2.0
│   ├── Boardsschematic.sch
│   └── Boardsschematic.brd
└── Protokol ..... Návod k měření
    └── LEDProtokol.pdf
```