

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2021

Jindřich Žabka



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 měřicí 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: 5.8.2021

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, 61 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	11
1 Světlo a jeho měření	12
1.1 Světlo	12
1.2 Radiometrie a fotometrie	12
1.2.1 Radiometrické veličiny	13
1.2.2 Fotometrické veličiny	14
1.2.3 Pomocné veličiny	16
2 Diody typu LED	19
2.1 Provozní parametry	19
2.2 PN přechod	19
2.3 Konstrukce LED	20
2.4 Generace bílého světla pomocí LED	22
2.4.1 Přímé mísení světla	22
2.4.2 Fosforescence luminoforů	23
2.5 Použitá pouzdra SMD LED	24
3 Optická spektroskopie	26
3.1 Fyzikální pojmy	26
3.1.1 Koherence	26
3.1.2 Difrakce	26
3.1.3 Interference	27
3.1.4 Chromatická disperze	28
3.2 Disperzní hranol	28
3.3 Difrakční mřížka	30
3.4 Typy detektorů a princip jejich funkce	32
3.5 Další optické komponenty	33
3.6 Přístroje využívané k optické spektroskopii	34
3.6.1 Michelsonův interferometr	34
3.6.2 Fabry-Perotův interferometr	35
4 Návrh měřicího pracoviště	36
4.1 Schéma zapojení	36
4.1.1 Napájení pracoviště	36
4.1.2 Obsluha posuvného zařízení	36
4.1.3 Měřicí část pracoviště	39
4.2 Výpočet vhodného umístění fotodiody	40

4.3	Prostředí NI LabVIEW	41
4.3.1	SCPI standard	41
4.3.2	OphirLMMeasurement	42
4.3.3	Uživatelské rozhraní	42
4.3.4	Důležité části blokového diagramu	43
4.4	Arduino kód	46
4.5	Desky plošných spojů pro LED	47
4.6	Sestavené pracoviště	49
4.7	Postup měření	50
4.8	Naměřené hodnoty	51
5	Porovnání s katalogovými listy	53
	Závěr	54
	Literatura	55
	Seznam příloh	58
A	Uživatelské rozhraní aplikace	59
B	Osazené DPS a seznam součástek	60
B.1	Seznam součástek	60
C	Obsah přiloženého ZIP souboru	61

Seznam obrázků

1.1	Fotometrická plocha svítivosti (převzato z [5])	15
1.2	Jas vůči pozorovateli (převzato z [5])	16
1.3	Definice prostorového úhlu (převzato z [5])	16
1.4	Závislost $V(\lambda)$ na vlnové délce (upraveno z [4])	17
1.5	Teplota chromatičnosti od teplého do studeného odstínu (převzato z [5])	18
1.6	Znázornění indexu podání barev (převzato z [10])	18
2.1	Struktura LED (převzato z [2])	20
2.2	Konstrukce DIP LED (upraveno z [11])	21
2.3	Konstrukce SMD LED (převzato z [8])	21
2.4	Spektrální charakteristika RGB LED [Vytvořeno v MS Excel]	22
2.5	Modrá LED a luminofor ve studené bílé LED a charakteristika teplé bílé LED [Vytvořeno v MS Excel]	24
2.6	Zobrazení jednotlivých pouzder [12]	25
3.1	Úhel deviace a spektrální závislost indexu lomu F_2 (převzato z [18])	29
3.2	Konstrukce hranolového spektrometru [inkscape]	29
3.3	Druhy difrakčních mřížek (Upraveno z [18])	31
3.4	Czerny-Turner spektrometr	32
3.5	Michelsonův interferometr	35
4.1	Schéma zapojení pracoviště	36
4.2	Nákres motoru a vnitřní zapojení cívek [27]	37
4.3	Pinout driveru A4988 (převzato z [28])	38
4.4	Přípevnění koncového dorazu	38
4.5	(a) Vega Ophir [26](b) Fotodioda PD300 [26]	39
4.6	Mřížky prodávané Thorlabs (převzato z [18])	40
4.7	Nákres pro výpočet vzdáleností na pracovišti (nakresleno v Inkscape)	41
4.8	Navázání komunikace	43
4.9	Výběr LED	44
4.10	Nastavení hodnot napájecího zdroje	44
4.11	Přepočty na svítivost	45
4.12	Měřicí smyčka	46
4.13	(a) Schéma desky (b) Deska	48
4.14	(a)(b) Náhledy na 3D objekt (c) Reálný objekt	48
4.15	Pracoviště	49
4.16	Pracoviště	50
4.17	Závislosti pro pouzdro 5730	51
4.18	Závislosti pro pouzdro 5050	51

4.19	Závislosti pro pouzdro 2835	52
4.20	Závislosti pro pouzdro 3528	52
5.1	Referenční měření z katalogových listů [14]	53
A.1	GUI	59
B.1	Osazené desky plošných spojů	60

Seznam tabulek

1.1	Fotometrické veličiny odpovídající radiometrickým	12
2.1	Typické hodnoty parametrů jednotlivých SMD pouzder	25

Úvod

Účelem této bakalářské práce je seznámení čtenáře se základními parametry LED, prostředky k jejich spektrální analýze a seznámení s programovým prostředím LabVIEW. Tato práce poskytuje přehled nejdůležitějších radiometrických a fotometrických veličin a vztah mezi nimi. Pro definici a převod těchto veličin jsou zde zmíněny i další pomocné veličiny, včetně parametrů definujících podání barev ve vztahu k lidskému zraku. V další části se práce zabývá elektroluminiscenčními diodami, přičemž je rozebrán princip vzniku světla z PN přechodu a provozními parametry. Jsou zde popsány dvě nejčastější konstrukce a to DIP a SMD. Jelikož vývoj elektroluminiscenčních diod stále pokračuje, jsou pro tuto aplikaci vybrány jak zastaralá, tak i nová pouzdra SMD. Navazuje popis tvorby bílého světla v těchto diodách, jejich typické spektrální charakteristiky a vlivy které je negativně afektují. Na to navazuje kapitola o optické spektroskopii, která je rozdělena na jednotlivé laboratorní komponenty často využívané při spektrální analýze. Pro analýzu jsou fundamentální některé fyzikální zákonitosti, které jsou na začátku této kapitoly probrány. Důraz se přitom klade na seznámení s difrakční mřížkou a disperzním hranolem. Jelikož pro různé aplikace jsou vhodné různé přístroje, jsou zde uvedeny i příklady několika dalších konfigurací pro spektrální analýzu se stručným popisem jejich funkce. Praktická část na začátku představuje použité přístroje a komponenty na pracovišti, jejich základní specifikace, zapojení a funkci na pracovišti. U pracoviště se využívá k ovládání jednotlivých přístrojů sběrnice USB skrze prostředí LabVIEW, přičemž je popsána funkce nejdůležitějších částí programu. Následují ilustrační obrázky ukazující sestavení pracoviště a dosažené výsledky 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 (UV) má kratší vlny, jmenovitě o délkách mezi $\lambda = 10 \div 380$ nm. Infračervené záření (IR) navazuje na viditelné světlo, ale šíří se pomaleji, jeho vlnové délky jsou mezi 780 nm a 100 μ m. Vztah frekvence f a vlnové délky λ 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	Φ_e	W	Světelný tok	Φ_v	lm
Ozáření	E_e	W m^{-2}	Osvětlenost	E_v	lx
Zářivost	I_e	W sr^{-1}	Svítivost	I_v	cd
Zář	L_e	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$	Jas	L_v	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 Φ_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 [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 Ω . Jednotkou je tudíž podíl jejich jednotek [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 θ 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 Φ_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

Φ_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 Φ_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 $1 \text{ [lm m}^{-2}\text{]}$. 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 α pod kterým světlo dopadá na bod X a jeho přílehlou plochu [1][5][4].

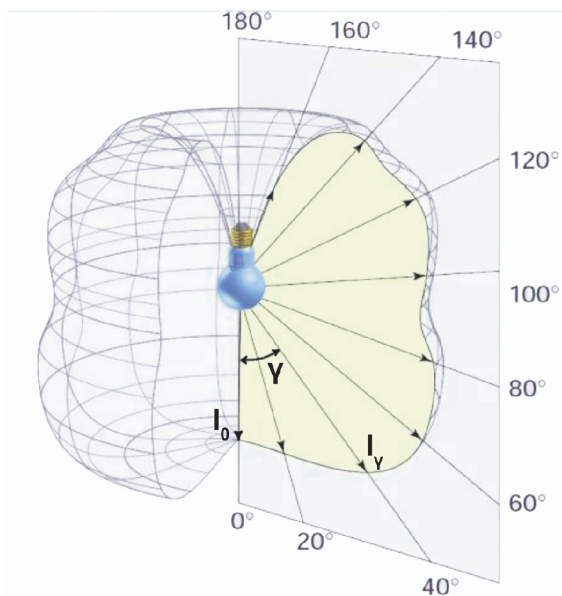
$$E_X = \frac{I}{l^2} \cdot \cos \alpha \quad [\text{lx}] \quad (1.9)$$

Svítivost I_v

Svítivost je jedna ze základních jednotek SI, udávaná v jednotkách kandela [cd], která je definována světelným tokem Φ_v a prostorovým úhlem Ω 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].



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

Jas L_v

Vyjadřuje množství světelného toku vyzářeného, průchozího či odráženého 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:

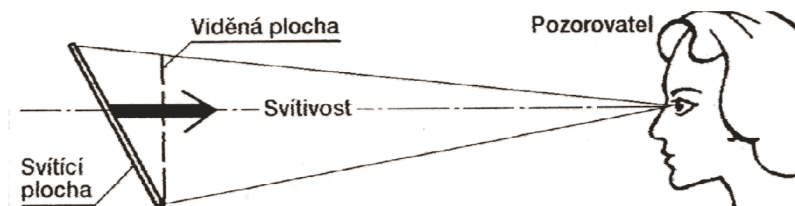
$$L_v = \frac{dI_v}{dS \cdot \cos \gamma} \quad [\text{cd m}^{-2}] \quad (1.11)$$

dI_v : je svítivost $dI = d\Phi_v/d\Omega$ [cd] ve směru pod úhlem γ 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].



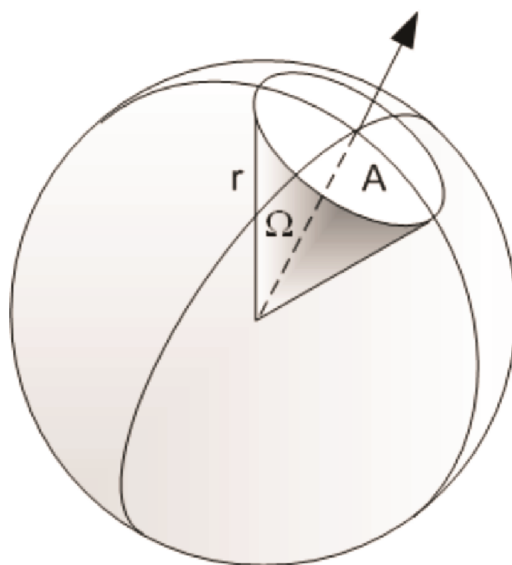
Obr. 1.2: Jas vůči pozorovateli (převzato z [5])

1.2.3 Pomocné veličiny

Prostorový úhel Ω

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 poloměr koule. Jednotkou Ω je steradián [sr]. Maximální hodnota, které může prostorový úhel dosáhnout je $\Omega_{max} = 4\pi$, tedy pro povrch celé koule. Vrcholem Ω 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:

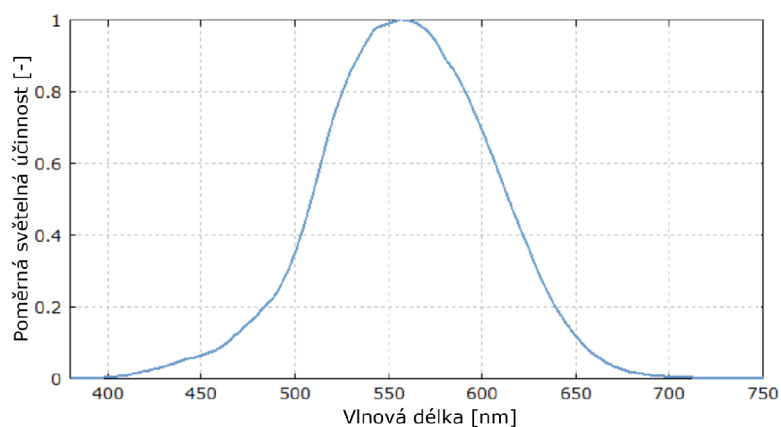
$$K = \frac{d\Phi_v}{d\Phi_e} \quad [\text{lm W}^{-1}] \quad (1.13)$$

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 $\lambda = 555 \text{ nm}$ 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 λ 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]:

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

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. 1.5. Teplota chromatičnosti

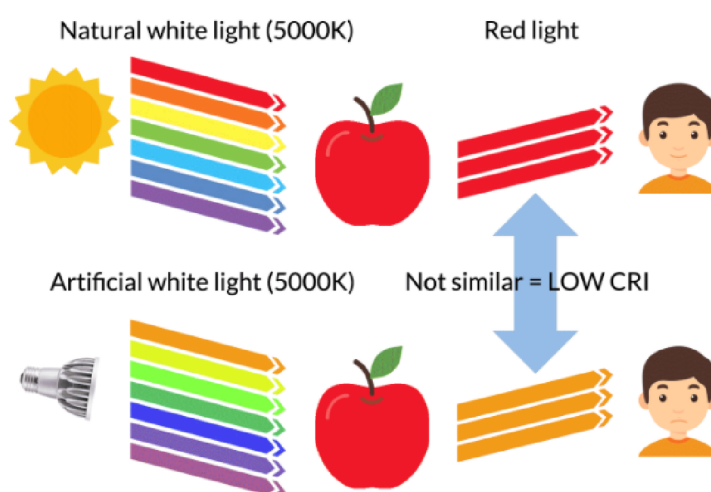
se udává v Kelvinech [K] a rozděluje barvy na teplé a studené. Tento parametr má při osvětlování velkou váhu, jelikož ovlivňuje i psychiku člověka z pohledu vlivu na biorytmus. Západ slunce má nižší hodnoty teploty než jaké jsou při východu, což lidem fyziologicky podněcuje vnímání teplejší barvy jako klidnější a vhodnější pro osvětlení před spánkem [5].



Obr. 1.5: Teplota chromatičnosti od teplého do studeného odstínu (převzato z [5])

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 neznámá, 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. 1.6: Znázornění indexu podání barev (převzato z [10])

2 Diody typu LED

2.1 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:

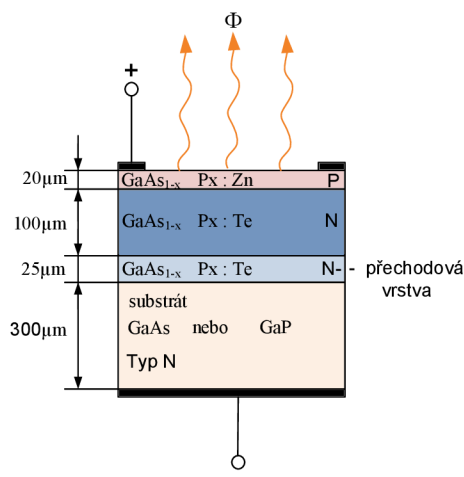
- a) *Nízkopříkonové*, kde se proud pohybuje od 1 do 2 mA.
- b) *Standardní*, kde se proud pohybuje od 10 do 60 mA, u modernějších diod do hodnot 200 mA.
- c) *Výkonové (High Voltage)*, kde se proud pohybuje v hodnotách stovek mA.

2.2 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. 2.1: Struktura LED (převzato z [2])

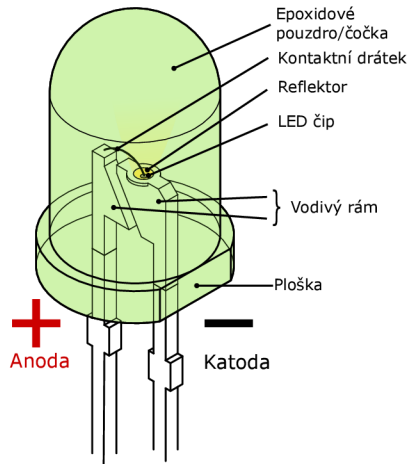
2.3 Konstrukce LED

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. Pouzdem 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

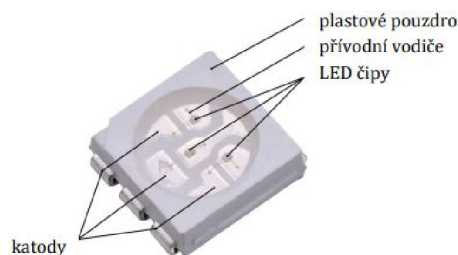
při chlazení diody. DIP nejsou vhodné k osvětlovacím účelům právě kvůli chlazení, jejich využitím jsou předně kontrolky, signálky či na velkoplošných obrazovkách. Naopak jejich výhodou je vysoká mechanická odolnost a také odolnost vůči vlhkosti, kvůli plastem chráněnému PN přechodu. Životnost těchto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



Obr. 2.2: 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. 2.3: 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, světelná účinnost až $K = 120 \text{ lm W}^{-1}$ a běžným vyzařovacím úhlem je $\Omega = 120^\circ$ [7][8].

2.4 Generace bílého světla pomocí LED

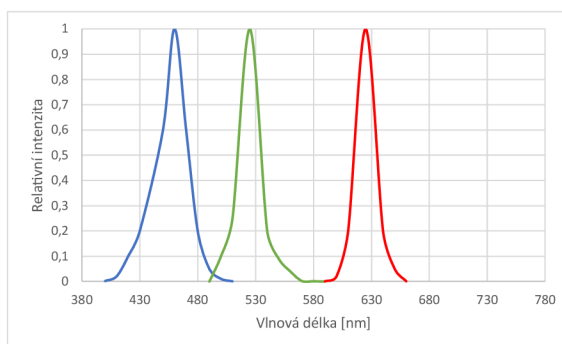
Z podstaty fungování LED se dá vyvodit, že jsou schopny vyzařit z PN přechodu vjem pouze určité barvy. K výrobě bílé LED vznikly dva hlavní způsoby.

2.4.1 Přímé mísení světla

Prvním, starším způsobem, je umístění tří LED čipů do jednoho pouzdra, kde přímým mísením všech tří diod červené, modré a zelené barvy v určitém poměru vznikne vjem bílé barvy. Využívá se zde RGB systém, který se též uplatňuje například v monitorech počítačů nebo na LED páskách. Tato metoda je vhodná při aplikacích vyžadujících generaci bílého světla nebo rozsvícení kombinací jednotlivých diod ke generaci jakékoli barvy spektra. Nevýhodou tohoto systému je obtížné nastavení správného poměru jednotlivých složek pro správnou emitaci bílé barvy, prosvítání barevných složek na okrajích světelného kuželu a hlavně postupná ztráta kvality emitovaného bílého světla v důsledku stárnutí čipů [1].

Spektrální charakteristika RGB LED

V případě RGB systému je spektrum tvořeno třemi oddělenými vrcholy, které odpovídají modré ($\approx 460 \text{ nm}$), zelené ($\approx 525 \text{ nm}$) a červené barvě ($\approx 625 \text{ nm}$). Podle intenzity záření jednotlivých diod lze vyzařit i přibližný vjem chladné nebo teplé bílé převládající intenzitou buď modré nebo červené diody. Mezi vrcholy je však intenzita záření téměř nulová, což je důvod nízkého indexu podání barev [1].



Obr. 2.4: Spektrální charakteristika RGB LED [Vytvořeno v MS Excel]

Negativní vlivy na spektrální charakteristiku RGB LED

Vysoké teploty mohou zapříčinit rychlejší stárnutí čipů, zmenšení světelného toku, posun teploty chromatičnosti nebo i úplné selhání. Může dojít k posunu vrcholu vlnové délky, změně amplitudy a tvaru charakteristik jednotlivých čipů. Vlivem těchto posunů jsou okem pozorovatelné změny ve výsledné barvě oproti původní diodě [1].

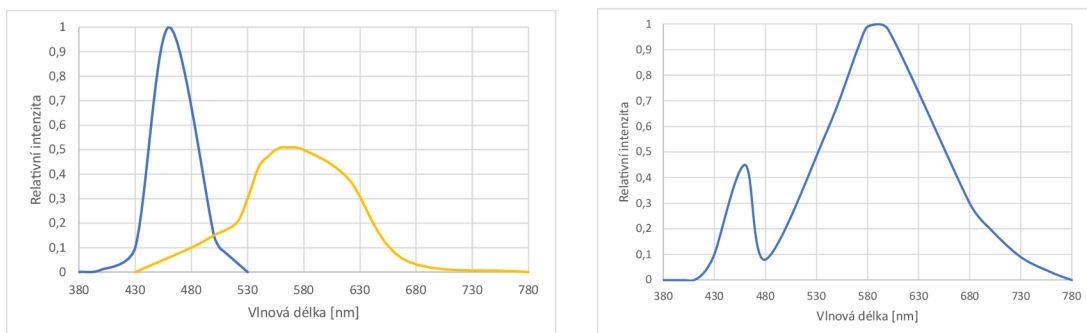
2.4.2 Fosforescence luminoforů

Luminofor je nanesen na čip modré nebo ultrafialové diody a buzen jejím světlem. Při záření diody se část energie modrého světla absorbuje ve vrstvě luminoforu, která ho vybudí do excitovaného stavu. Při přechodu do základního stavu poté dochází k emisi záření s delší vlnovou délkou. Vhodným luminoforem k modré diodě, která je nejčastěji tvořena z InGaN, je žlutý luminofor yttrito-hlinitý granát s příměsí céru (označován jako YAG:Ce, chemickým vzorcem $Y_3Al_5O_{12} : Ce^{3+}$). Nevýhodou může být horší index R_a a potlačení červené a části zelené složky spektra. Druhá možnost používá diody GaN či AlGaIn se světlem blízké ultrafialové oblasti kolem 370 nm a luminoforů dopovaných dvou nebo třímocnými ionty europia, terbia, céru či manganu. Na viditelném spektru se podílí pouze světlo emitované luminofory, které absorbují světlo diody a vyzařují určitou část viditelného spektra. Tento typ diod má vysoký index podání barev, ale často nižší účinnost než diody využívající modrou diodu [13].

Spektrální charakteristika LED s luminofory

Modrá dioda se žlutým luminoforem produkuje spektrum složené z úzkopásmového spektra diody se širokopásmovým spektrem luminoforu, čímž vznikne vjem studené bílé barvy. Po přidání červeného luminoforu společně se žlutým lze dosáhnout i teplé bílé a vyššího R_a . Tvar spektra může ovlivnit vrstva a koncentrace nanešeného luminoforu. Při vyšší vrstvě nebo koncentraci je více potlačeno světlo modré diody, luminofor emituje většinu záření spektra a LED vykazuje teplejší barvu, tedy nižší teplotu chromatičnosti. Se zvyšující se vrstvou také roste výsledný světelný tok se zvyšujícím se proudem, ale pouze do určité tloušťky luminoforu.

Bílé LED s ultrafialovou diodou využívají vrstev často tří luminoforů a to modré, zelené a červené barvy. Tvar výsledné spektrální charakteristiky může být laděn tloušťkou jednotlivých vrstev a jejich složením pro dosažení požadované teploty chromatičnosti T_C a indexu R_a [13].



Obr. 2.5: Modrá LED a luminofor ve studené bílé LED a charakteristika teplé bílé LED [Vytvořeno v MS Excel]

Negativní vlivy na spektrální charakteristiku

Posuv chromatičnosti vychází ze změn charakteristiky. Na tu má zde vliv degradace použité diody a luminoforů. Změny kvůli degradaci diody pak nastanou při snížení zářivého toku či posuvu vrcholu vlnové délky diody. Posuvu k některé barvě vlivem luminoforu dochází kvůli změně jejich účinnosti po chemických změnách nebo vlivem teploty. Separace či popraskání vrstev vede k rozdílné propustnosti světla diody, což v případě modré diody se žlutým luminoforem může světlo zbarvit více do modra nebo do žluta. Veškeré mechanismy vedoucí ke změnám spektrální charakteristiky jsou urychlovány vysokými teplotami [13].

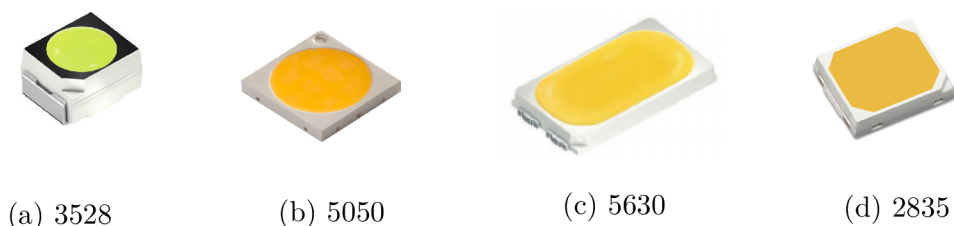
2.5 Použitá pouzdra SMD LED

SMD LED se značí kombinací čtyř čísel, které udávají fyzické rozměry diody. Například čip 3528 má rozměry 3.5×2.8 mm. Rozdíly mezi jejich parametry jsou zaznamenány v tabulce 2.1. Tato práce se zabývá standardními LED bílé barvy využívajících žlutý luminofor. Informace o jednotlivých pouzdrech z [12] a technické údaje jsou k nalezení u prodejce [14] v sekci dokumentace ke stažení u každé z diod.

Jednotlivá zkoumaná pouzdra

Pouzdro 3528

3528 je jeden z nejstarších, avšak v současnosti stále jeden z nejčastěji používaných 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, políček, barů atp.



Obr. 2.6: Zobrazení jednotlivých pouzder [12]

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 $5.6 \times 3.0\text{ mm}$ (respektive $5.7 \times 3.0\text{ mm}$), 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. 2.1: Typické hodnoty parametrů jednotlivých SMD pouzder

Typ pouzdra	I_F [mA]	V_F [V]	I [lm]
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	$3 \div 3.4$	$12 \div 13$

3 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 záření, prvek, na kterém má dojít k potřebné interakci, detektor, který zaznamená záření po interakci s prvkem a případné další optické komponenty pomáhající k manipulaci se zářením [17][19].

3.1 Fyzikální pojmy

3.1.1 Koherence

Koherentní vlnění jsou taková, která mají stejnou frekvenci, stejný směr a konstantní fázový posun, který se v určitém bodu prostoru s časem nemění. V realitě jsou však vlny buď nekoherentní nebo mají pouze určitou míru koherence. Míra koherence je udávána časovou a prostorovou koherencí. Časová koherence popisuje monochromatickosti zdroje záření, neboli jak stabilní je fázový posuv vln v určitém bodě v závislosti na čase. Stabilita fázového posuvu také udává míru interference. Prostorová koherence popisuje uniformnost vlny v prostoru, neboli vztah vln v různých místech prostoru v jednom čase [20].

3.1.2 Difrakce

Teorie difrakce popisuje fyzikální jev, kdy při dopadu rovinného vlnění na překážku nebo aperturu dochází k ohybu světla do oblasti geometrického stínu, nebo-li do míst, kde by záření podle principu přímočarého šíření světla nemohlo dopadnout. Tento fenomén se objevuje za podmínky, že překážkou je například ostrý předmět jako žiletka nebo u apertury menších rozměrů než daná vlnová délka. Okraj objektu se tímto podle Huygensova-Fresnelova principu stává v rámci dvourozměrného modelu sekundárním elementárním zdrojem kruhové vlnoplochy. V optice se rozlišuje Fresnelova a Fraunhoferova aproximace difrakčního integrálu. Obě tyto oblasti na sebe úzce navazují.

Fresnelova difrakce nastává v případě uvažovaného bodového zdroje v blízké zóně od objektu, na kterém dochází k difrakci. Přicházející vlnu ze zdroje nelze považovat za rovinnou, ale kulovou. Z toho důvodu na některé části přichází vlna dříve a fáze sekundárních zdrojů záření není stejná. Difrakční obrazec představuje intenzitu

světla jako funkci polohy, přičemž obrazec mění svou velikost a tvar při změnách vzdáleností stínítka či apertury.

Fraunhoferova difrakce nastává, pokud zdroj a plochu, na které zkoumáme difrakční obrazec, vzdalujeme od objektu na kterém dochází k difrakci až do tzv. vzdálené zóny, která je limitně v nekonečnu. Tehdy se dají pokládat vlny přicházející na aperturu jako rovinné a tedy fáze kmitů z apertury bude shodná. Difrakční obrazec vzniklý na zkoumané ploše nebo v ohnisku čočky pochází z rovinné vlny složené z elementárních kmitání. Popisuje rozložení intenzity jako funkci směru. Do určité vzdálenosti ale nastává Fresnelova difrakce, kde intenzita nevstupuje do geometrického stínu, jelikož je v tomto prostoru efektivně rušena destruktivní interferencí [9].

3.1.3 Interference

Interferencí rozumíme skládání vln z konečného počtu zdrojů, superpozici, kde se vlny vzájemně zesilují či potlačují. Tento jev je pozorovatelný na stínítku jako interferenční obrazec na kterém se střídají místa maxim a minim optické intenzity. Nutnou podmínkou pro pozorování interferenčního obrazce je jejich souhlasná polarizace a koherence vln, nicméně i nekoherentní vlny interferují. Stejně jako u difrakce, interference je u světla dána jeho vlnovým charakterem. Prvním extrémem je konstruktivní interference co nastane u vln, jež se setkají v místě a čase s nulovým nebo celočíselným fázovým rozdílem, tedy $\Delta\varphi = 2k\pi$ pro $k = 0, 1, 2, \dots$ Druhým extrémem je destruktivní interference nastávající u vln, které se setkávají v protifázi, tedy s fázovým rozdílem $\Delta\varphi = (2k - 1)\pi$ pro $k = 1, 2, 3, \dots$ Výsledné vlnění je součtem intenzit elektrického pole. Optická intenzita je pak dána vztahem:

$$I_{\Sigma} = c\varepsilon_0 n \langle |E_1 + E_2|^2 \rangle_t = c\varepsilon_0 n \left(\frac{1}{2}A_1^2 + \frac{1}{2}A_2^2 + A_1A_2 \cos \phi \right) \quad (3.1)$$

kde $E_1(\vec{r}, t)$ a $E_2(\vec{r}, t)$ jsou intenzity elektrického pole; t je čas; A_1 a A_2 jsou reálné amplitudy; ϕ je rozdíl fázových funkcí obou vln, závislých na polohovém vektoru. Optická intenzita jednotlivých vln je pak $I_1 = \frac{1}{2}c\varepsilon_0 n A_1^2$ a $I_2 = \frac{1}{2}c\varepsilon_0 n A_2^2$ a interferenční člen udávající interferenci mezi danými vlnami $J_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi$. Měřítkem kvality interference je kontrast. Jak bylo řečeno výše, vlny nejsou v realitě plně koherentní a proto se k interferenčnímu členu přidává γ_{12} vyjadřující stupeň koherence. Kontrast je dán vztahem:

$$K = \frac{4\sqrt{I_1 I_2}}{2(I_1 + I_2)} \gamma_{12}; \quad 0 \leq \gamma_{12} \leq 1 \quad (3.2)$$

Za podmínky plné koherence $\gamma_{12} = 1$ a $I_1 = I_2$ bude minimální intenzita $I_{min} = 0$, maximální $I_{max} = 4I_1$ [9].

3.1.4 Chromatická disperze

Samotný pojem disperze označuje závislost fázové rychlosti na dalším parametru a je často parazitním jevem například v optických vláknech. V případě chromatické disperze je fázová rychlost závislá na vlnové délce. Je také popisována jako materiálová disperze, jelikož vzniká kvůli závislosti indexu lomu materiálů na frekvenci. Toho se využívá při cíleném rozkladu polychromatického svazku na jednotlivé komponenty. Měřítkem chromatické disperze materiálu je Abbeho číslo $V_d = (n_d - 1)/(n_f - n_c)$, dané indexy lomu pro vlnové délky $D = 589.2 \text{ nm}$, $F = 486.1 \text{ nm}$ a $C = 656.3 \text{ nm}$. Malé Abbeho číslo znamená vysokou disperzi. Obvyklým disperzním prvkem při zkoumání viditelného světla bývá hranol a difrakční mřížka [3].

3.2 Disperzní hranol

láme světlo na rozhraní prostředí vzduch-hranol při vstupu do hranolu a hranol-vzduch při výstupu. Jsou to průhledné komponenty obvykle trojúhelníkového průřezu z optického skla. Příkladem užívaných materiálů s propustností pro viditelné pásmo jsou fluorid vápenatý CaF_2 s širokým pásmem propustnosti od UV až po infračervené pásmo ($\approx 180 \text{ nm} \div 8 \mu\text{m}$), křemenové sklo F_2 vhodné pro viditelné až blízké IR pásmo ($\approx 385 \text{ nm} \div 2 \mu\text{m}$) nebo N-SF11 s vysokou disperzí a indexem lomu s propustností pro vlnové délky ($\approx 420 \text{ nm} \div 2.3 \mu\text{m}$). Index lomu se označuje \mathbf{n} a je poměrem rychlosti světla ve vakuu \mathbf{c} ku rychlosti \mathbf{v} v daném prostředí.

$$n = \frac{c}{v} \quad [-] \quad (3.3)$$

Lom na rozhraní vyjadřuje Snellův zákon

$$n_1(\lambda) \cdot \sin \varepsilon_1 = n_2(\lambda) \cdot \sin \varepsilon_1' \quad (3.4)$$

kde $n(\lambda)$ jsou indexy lomu, které jsou závislé na vlnové délce, relativních permittivitách a permeabilitách prostředí. ε_1 je úhel dopadu a ε_1' je úhel lomu. Jelikož je index lomu frekvenčně závislý, spektrální složky obsažené v polychromatickém světle se budou za rozhraním lámat pod jinými úhly, přičemž disperze je výraznější u kratších vlnových délek. Úhel deviace δ , který udává celkovou odchylku lomeného paprsku určité vlnové délky na výstupu hranolu od úhlu dopadajícího, je dán:

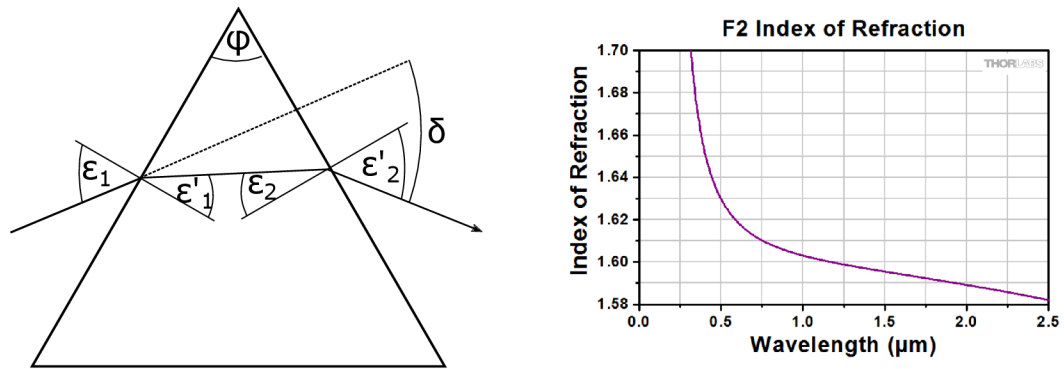
$$\delta = (\varepsilon_1 - \varepsilon_1') + (\varepsilon_2 - \varepsilon_2') = \varepsilon_1 + \varepsilon_2' - \varphi \quad (3.5)$$

kde φ je lámavý úhel. Úhel minimální deviace δ_{min} nastává v případě, kdy paprsek monochromatického světla vchází i vychází z hranolu pod stejným úhlem. Tento

případ nastává, když se $\varepsilon'_1 = \varepsilon_2$ a zároveň $\varepsilon_1 = \varepsilon'_2$. Tento úhel se využívá při určování indexu lomu hranolu pro danou vlnovou délku následujícím vztahem [16]:

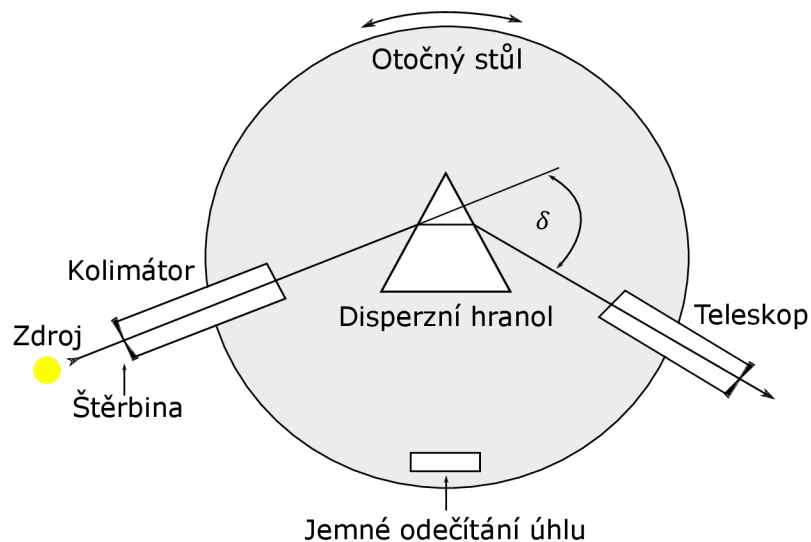
$$n = \frac{\sin \frac{\varphi + \delta_{min}}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} \quad (3.6)$$

Výhodou disperzního hranolu jsou nízké výkonové ztráty, nevytváří vyšší řády světla a obecně široké pásmo propustnosti[15][17].



Obr. 3.1: Úhel deviace a spektrální závislost indexu lomu F_2 (převzato z [18])

Disperzní hranol se používá v hranolovém spektrometru. Zde je záření ze zdroje přes štěrbinu přivedeno do kolimátoru, který záření paralelizuje. Paralelní paprsky jsou pak směřovány na hranol umístěný na otočné ploše a dochází zde k lomu a případné disperzi, pokud jde o záření polychromatické. Na druhém rameni, které může rotovat, se nachází objektiv s okulárem. Při rotaci objektivu lze pozorovat čáry spektra v různých úhlech.



Obr. 3.2: Konstrukce hranolového spektrometru [inkscape]

3.3 Difrakční mřížka

Mřížka je utvořena vysokým množstvím periodických vrypů do skleněného substrátu. Materiálem na výrobu transmisních mřížek bývá sklo Schott B270 nebo UV Fused Silica pro aplikace v UV oblasti. Reflektivní mřížky mají povrch sodnovápenetého skla potažen hliníkovou reflektivní vrstvou s případnými příměsemi. Vrypy mřížky mají vzájemnou vzdálenost a , nazývanou mřížková konstanta. Uvažujme transmisní mřížku s přibližně obdélníkovými vrypy na kterou kolmo dopadá rovinná vlna, tudíž vzniklá sekundární vlnění budou kmitat ve fázi. Vzniklé sekundární elementární zdroje na štěrbinách budou vytvářet válcové vlnoplochy, jejichž složením vzniknou vlnoplochy jednotlivých složek. Interference příspěvků konečného počtu sekundárních zdrojů směřujících z N vrypů do určitého směru vynásobená difrakcí z jedné apertury nám udává výslednou intenzitu světla v bodě prostoru pro určitou vlnovou délku. Důležitým vztahem je mřížková rovnice:

$$\sin \vartheta_m - \sin \theta_i = \frac{\lambda}{a} m \quad (3.7)$$

Pokud tedy dopadne rovinná vlna o vlnové délce λ pod úhlem θ_i , nastane ve směru difrakce ϑ_m interferenční maximum m -tého řádu. Všimněme si, že interferenční maximum řádu 0 po dosazení znamená $\sin \vartheta_m = \sin \theta_i$ a vlna prochází za mřížkou původním směrem. Výhodou mřížek oproti hranolům je linerita disperze s vlnovou délkou. Při vyšším počtu vrypů se interferenční maxima zužují. Při osvětlení polychromatickým světlem vznikají maxima v různých místech a jejich poloha závisí na vlnové délce světla. Míra odklonu vlnové délky difrakčním prvkem je dána úhlovou disperzí:

$$D_\vartheta = \frac{m}{a \cos \vartheta} = \frac{d\vartheta}{d\lambda} \quad (3.8)$$

U difrakčních mřížek je důležitým aspektem překrývání difrakčních úhlů vlnových délek s vedlejšími maximy dalších difrakovaných vlnových délek. Pokud tedy zkoumáme záření o vlnových délkách od λ_1 po λ_2 , volný spektrální interval vlnových délek pro m -té řády maxim je dán:

$$\Lambda = \frac{\lambda_1}{m} \quad (3.9)$$

Z toho vyplývá, že se s každým vyšším m tento interval zužuje a maxima se více překrývají. Rozložené záření prvního difrakčního maxima lze tedy měřit bez zkreslení druhým maximem pouze v intervalu vlnových délek do dvounásobku kratší vlnové délky. Rozlišovací schopnost difrakční mřížky, tedy nejmenší posun vlnových délek, jaký lze s danou mřížkou rozlišit je dán:

$$R = \frac{\lambda_1}{\Delta\lambda} = Nm; \quad \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (3.10)$$

kde $\Delta\lambda$ je nejmenší rozdíl dvou délek odpovídajících maximům, které lze rozlišit [9].

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

$$a [\sin(\theta_m) - \sin(\theta_i)] = m\lambda \quad (3.11)$$

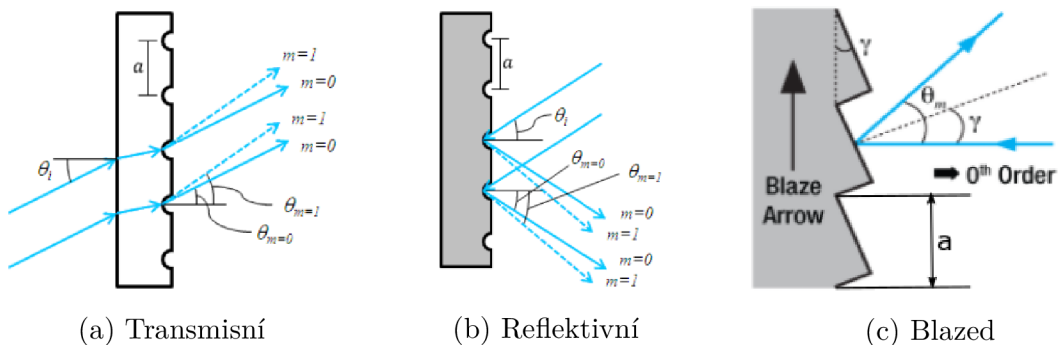
Reflektivní mřížky fungují na podobném principu jako transmisní, ale zde je povrch tvořen či potažen odrazivým materiálem, od kterého se světlo odráží pod úhly θ_m korespondujícími s vlnovými délkami a řády maxima.

$$a [\sin(\theta_m) + \sin(\theta_i)] = m\lambda \quad (3.12)$$

Blazed mřížka má periodické vrypy trojúhelníkového tvaru s určitým úhlem náklonu γ 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 γ [18][21].

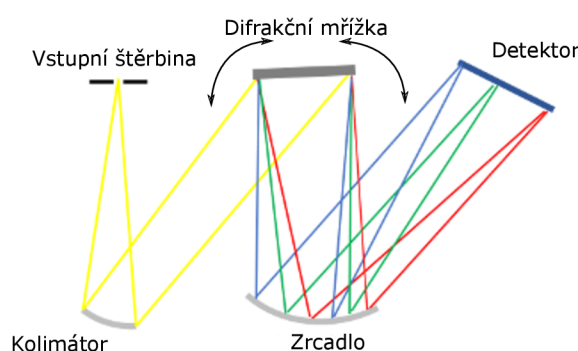
$$a \sin(-2\gamma) = m\lambda \quad (3.13)$$

Při příchodu rovinné vlny se nultý difrakční řád odrazí ve směru normály k struktuře mřížky a θ_m na 2γ .



Obr. 3.3: Druhy difrakčních mřížek (Upraveno z [18])

Využití difrakčních mřížek se nachází v monochromátorech a spektrometrech. Částé je uspořádání Czerny-Turner, které se skládá z dvou konkávních zrcadel, otočné difrakční mřížky, vstupní štěrbinu a zdroje záření. Přes vstupní štěrbinu je přivedeno světlo ze zdroje na první konkávní zrcadlo, které funguje jako kolimátor a paralelizuje ho. Na reflektivní mřížce pak dojde k difrakci záření, které dopadá na další konkávní zrcadlo. Z něho je již rozložený světelný svazek na spektrální složky fokusován na výstup. Na výstupu pak může být umístěna další štěrbinu pro průchod úzkého intervalu vlnových délek, které jsou pak snímány detektorem. Natáčením difrakční mřížky si lze vybírat jakou část spektra chceme štěrbinou propustit. Druhou možností je fokusace na pole CCD, pro širokospektrální analýzu intenzit [3].



Obr. 3.4: Czerny-Turner spektrometr

3.4 Typy detektorů a princip jejich funkce

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 η . 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 $E_G = 1.12$ 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 fotokatodou, 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 proporcčně 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][22].

3.5 Další optické komponenty

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 neměnilo jeho směr šíření. Jsou to filtry typu pásmová propust, pásmová zádrž, horní propust a dolní propust. Dle principu a účelu jsou děleny na různé kategorie jako absorpční, polarizační, dichroické nebo neutrální filtry. [3]

Kolimátory

Optické zařízení, které pomocí konvexní čočky nebo achromatického doubletu mění směr rozbíhavých paprsků ze zdroje záření. Na kolimátor je přes štěrbinu s nastavitelnou šířkou a výškou přivedeno záření ze zdroje. Aperatura přes kterou má být přivedeno záření musí být v ohniskové vzdálenosti čočky. Výstupem z kolimátoru jsou ideálně paralelní paprsky [3].

Zrcadla

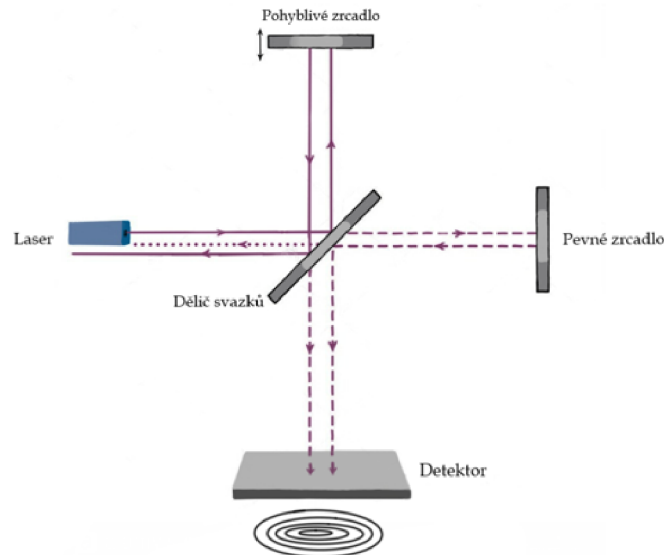
Mění směr šíření záření odrazem na definovaném rozsahu vlnových délek a úhlů dopadu. Účinnost odrazu bývá typicky alespoň 90 %, přičemž moderní zrcadla dosahují na 99 %. Zrcadla mohou být rovinná, zahnutá konvexně nebo konkávně či jinak. Pro širokopásmové aplikace od UV po IR se využívají metalická zrcadla, kde je skleněný materiál potažen nejčastěji hliníkem a stříbrem, ale využívá se i zlato, měď, chrom a další. Pro úzkopásmové aplikace s lasery se hodí dielektrická zrcadla využívající k odrazu interference mezi vrstvami materiálu nanesených na přední straně skla. [3]

3.6 Přístroje využívané k optické spektroskopii

3.6.1 Michelsonův interferometr

Toto zařízení je základem spektrometrů využívajících Fourierovu transformaci. Skládá se ze dvou navzájem kolmých rovinných zrcadel, zdroje záření, jednoho děliče svazku (*beam splitter*) svírajícího s každým ze zrcadel 45° a detektoru. S jedním ze zrcadel lze hýbat a měnit tak vzdálenost od děliče svazku, který je ve formě polopropustného zrcadla s reflektivitou kolem 50 %. Svazek paprsků je na děliči rozdělen na dvě části, které po odrazu od zrcadel znovu rekombinují na děliči a dopadají společně na detektor. Pokud je dráhový rozdíl obou zrcadel od děliče nulový nebo je celým násobkem vlnové délky záření, dojde ke konstruktivní interferenci a optický výkon na detektoru je maximální. Při nenulovém rozdílu postupně dochází k destruktivní interferenci, přičemž minimální výkon bude pro dráhový rozdíl poloviny vlnové délky záření a jejím celým násobkům. U polychromatického záření dojde k superpozici příspěvků kosinových vln různých frekvencí při pohybu zrcadla. Výstupem je interferogram popisující závislost optické intenzity na čase. Aplikací diskrétní Fourierovy

transformace se získá spektrum jako závislost výkonové spektrální hustoty na vlnové délce. Nejčastější využití nachází při měření infračervených spekter a přesné měření vzdáleností. Existují i interferometry bílého světla Michelsonova typu, ale obecně vzato nejsou tyto metody vhodné ke zkoumání spekter obvyklých LED. [23]



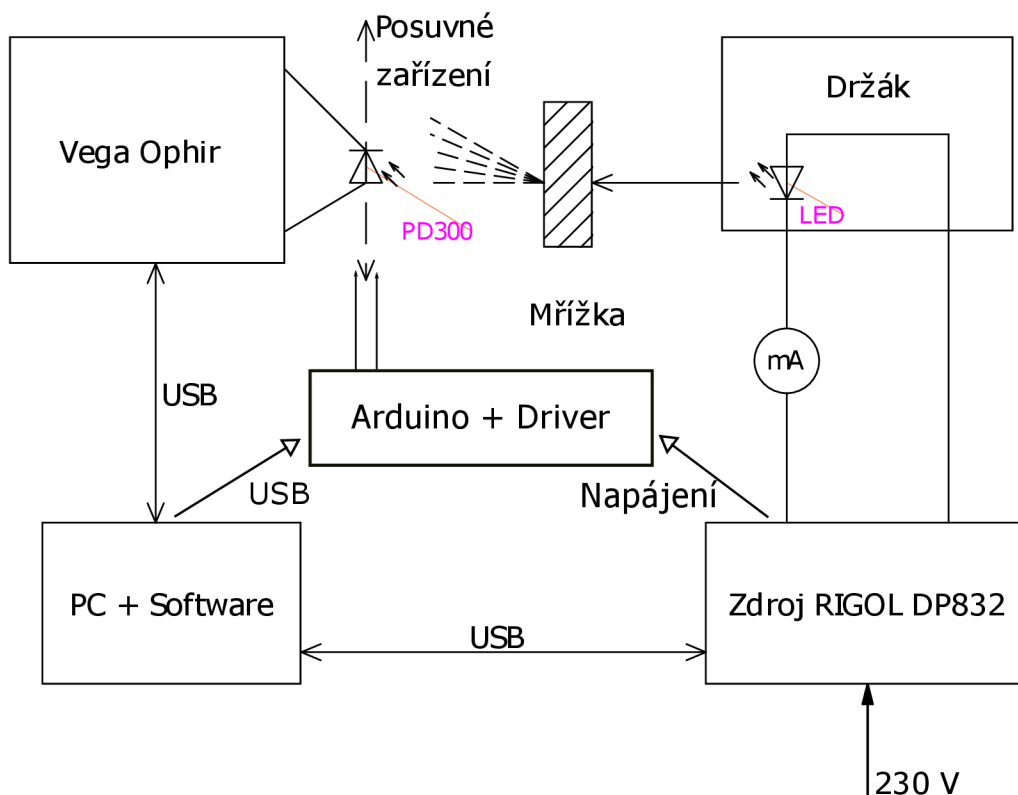
Obr. 3.5: Michelsonův interferometr

3.6.2 Fabry-Perotův interferometr

Jde o lineární optický rezonátor, složený v základu z dvou paralelních vysoce rovinných zrcadel. Zrcadla jsou z jedné strany vysoce reflektivní a z druhé transmisivní. Vlny se začnou po vstupu do mezery mezi zrcadly odrážet, jsou mezi odrazy dány fázory s amplitudovými koeficienty odrazivosti a propustnosti. Část vlny projde skrz druhé zrcadlo a část se odrazí zpět k prvnímu, přičemž se jeho fáze změní o polovinu vlnové délky. Po výstupu z dutiny u vln se shodnou fází dojde k superpozici a interferují konstruktivně. Destruktivní interferencí se vyruší vlnění s opačnou fází. Rezonanční frekvence dutiny může být laděna změnou vzdálenosti zrcadel d , čímž se mění volný frekvenční interval ν_F udávající frekvenční vzdálenost mezi dvěma maximy vztahem $\nu_F = \frac{c}{2d}$. Dále je definován parametr F vycházející z odrazivosti, přičemž s vyšší odrazivostí je vyšší F . Šířka spektrálních čar je pak závislá na parametru F , kde při vysokém F jsou vrcholy užší a interferenční obrazec ostřejší. Tento interferometr se například využívá k určení modu a spektrální šířky čáry laserů, jako frekvenční filtr, jako senzor v optických jednomodových vláknech nebo ke zjištění vlnové délky světla s vysokou přesností. Nevyužívá se ke zkoumání spekter konvenčních LED, jelikož má nízký rozsah vlnových délek které dokáže pokrýt [24].

4 Návrh měřicího pracoviště

4.1 Schéma zapojení



Obr. 4.1: Schéma zapojení pracoviště

4.1.1 Napájení pracoviště

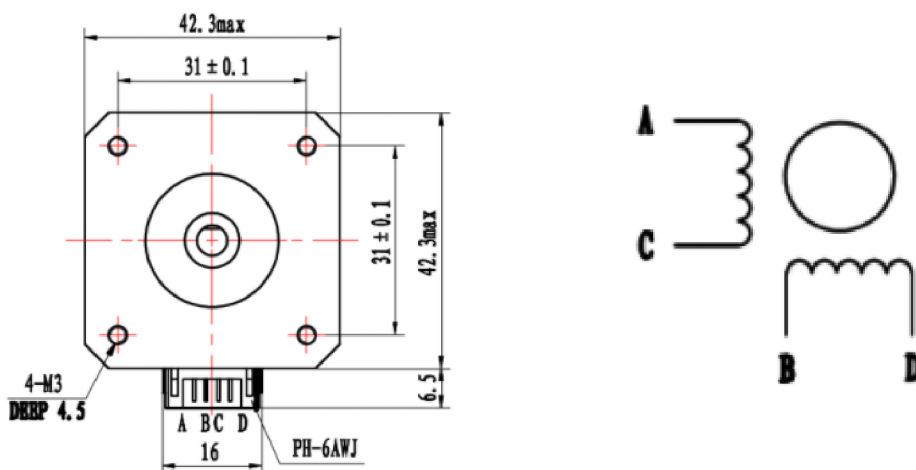
K napájení je využit tříkanálový programovatelný zdroj RIGOL DP832, ovládaný přes sběrnici USB z počítačového pracoviště [25]. Zdroj v této aplikaci napájí z prvního kanálu $3 \div 3.4$ V diodu umístěnou v držáku a zároveň z druhého kanálu 12 V driver krokového motoru A4988.

4.1.2 Obsluha posuvného zařízení

Lineární posuv s motorem NEMA17

Posuv probíhá na hliníkové drážce dlouhé 345 mm pomocí ozubeného řemenu a pojezdu se čtyřmi kolečky. Krokování zajišťuje bipolární krokový motor NEMA 17 typu 17HD48002-22B se čtyřmi vývody vinutí [27].

Jeho specifikacemi jsou:



Obr. 4.2: Nákres motoru a vnitřní zapojení cívek [27]

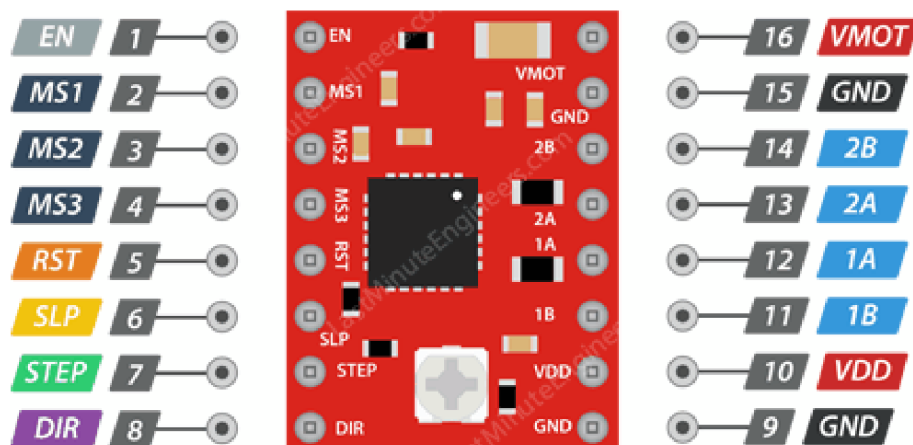
Parametr	Hodnota
Úhel kroku	1.8°
Proud vinutím	1.7 A
Indukčnost vinutí	3.8 mH
Odpor vinutí	1.8 mΩ
Přídržný moment	0.56 N m
Kroků na otáčku	200

Arduino Nano

Arduino je připojeno a napájeno přes USB Mini-B k počítači. Jeho digitální piny 8 a 9 jsou nastaveny jako výstupní a připojeny k driveru na STEP a DIR piny. Úroveň DIR pinu určuje směr otáčení motoru. Pro udělení jednoho kroku je poté potřeba nastavit úroveň na STEP nejdříve do 1 a poté do 0, což se opakuje pro více kroků za sebou v cyklu. Z arduina je driver napájen 5 V a mají společnou zem. K digitálnímu pinu 2, GND a 3.3 V je připojen koncový doraz, ze kterého je snímána logická úroveň. Pokud je úroveň v 1, je spínač rozepnut. Toho se využívá při návratu pojezdu do výchozí polohy viz 4.4.

Driver A4988

Krokování motoru řídí driver A4988 se zabudovaným překladačem k řízení pohybu krokových motorů do 35 V a 2 A. Pomocí úrovně pinů MS1 až MS3 lze nastavit krokování na celý, poloviční, čtvrtinový, osminový nebo šestnáctinový krok, přičemž nezapojené piny mají úroveň 0. Na driveru se nachází i trimr pro nastavení proudu do motoru [28].



A4988 Pinout

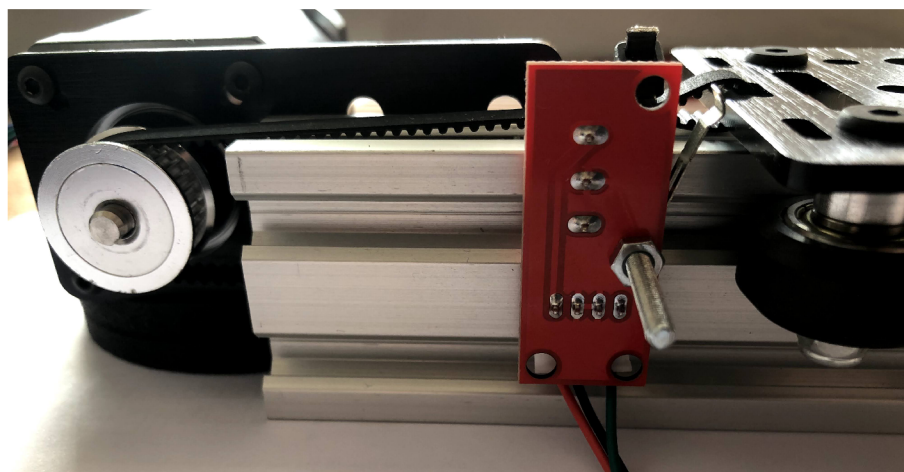


Obr. 4.3: Pinout driveru A4988 (převzato z [28])

kde MS1 a MS2 je připojeno na VDD=5V a MS3 je v 0, což zajistí osminový krok; RST a SLP jsou spojené vodičem; STEP, DIR, VDD a GND jsou připojené k Arduino Nano; 1A je spojen s vývodem motoru A; 1B s vývodem C; 2A s vývodem B; 2B s vývodem D. Na VMOT je pak připojeno napájení ze zdroje.

Koncový doraz

Spínač s třemi vodiči, který je napájen 3.3V z desky arduino a připojen na jeden z digitálních pinů. Při sepnutí se jeho logická úroveň změní z 1 na 0.



Obr. 4.4: Připevnění koncového dorazu

4.1.3 Měřicí část pracoviště

Fotodioda PD300 a Vega Ophir

Tato fotodioda je připojena k měřiči optického výkonu Vega Ophir a nasazena do držáku na jezdcí pojezdu. Vyčítání hodnot z Vega probíhá přes USB podle 4.3.2. PD300 disponuje aperturou o velikosti 10×10 mm a dokáže snímat spektrum světla na intervalu $350 \div 1100$ nm bez nasazeného filtru, $430 \div 1100$ nm s nasazeným filtrem. Světelné výkony měří na intervalu $500 \text{ pW} \div 30 \text{ mW}$, respektive $200 \text{ }\mu\text{W} \div 300 \text{ mW}$. Jelikož je plocha apertury 10×10 mm, je nutné použít clonu ke zmenšení plochy k minimalizování vlivu interferenčních maxim dalších vlnových délek [26].



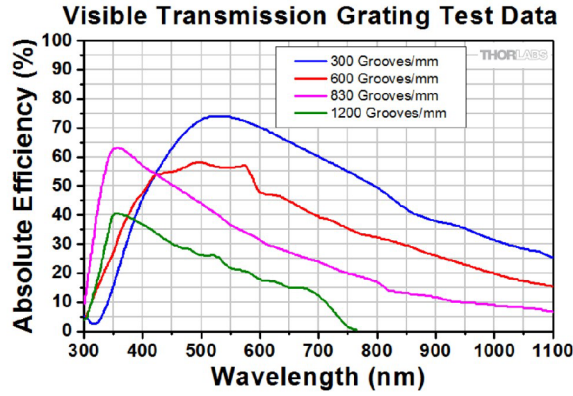
Obr. 4.5: (a) Vega Ophir [26](b) Fotodioda PD300 [26]

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 vrypy a se určí pomocí následujícího výpočtu:

$$N = 600 \frac{\text{lines}}{\text{mm}} = 600000 \frac{\text{lines}}{\text{m}} \Rightarrow a = \frac{1}{N} \text{ m} = \frac{1}{600000} = 1.666 \text{ }\mu\text{m} \quad (4.1)$$

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



Obr. 4.6: Mřížky prodávané Thorlabs (převzato z [18])

4.2 Výpočet 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 (3.11). Příklad výpočtu pro $\lambda = 380$ nm, maximum prvního řádu $m = 1$, mřížková konstanta $a = 1.666$ μm a při zdroji světla směřovaném kolmo k mřížce bude $\sin(\theta_i) = 0$.

$$a [\sin(\theta_{380}) - \sin(\theta_i)] = m\lambda \Rightarrow \sin(\theta_{380}) = \frac{m\lambda}{a} \Rightarrow \theta_{380} = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{a}\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot 380 \cdot 10^{-9}}{1,666 \cdot 10^{-6}}\right) = 13.179^\circ \quad (4.2)$$

Stejným způsobem se zjistí, pod jakým úhlem se bude lámat druhá krajní vlnová délka, tedy $\lambda = 760$ nm.

$$\theta_{760} = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{a}\right) = \arcsin\left(\frac{1 \cdot 760 \cdot 10^{-9}}{1,666 \cdot 10^{-6}}\right) = 27.129^\circ \quad (4.3)$$

Z důvodu nízkého výkonu některých LED 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:

$$x = \frac{d}{\tan(\theta_{760}) - \tan(\theta_{380})} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{\tan(27,129) - \tan(13,179)} = 179.7 \text{ mm} \quad (4.4)$$

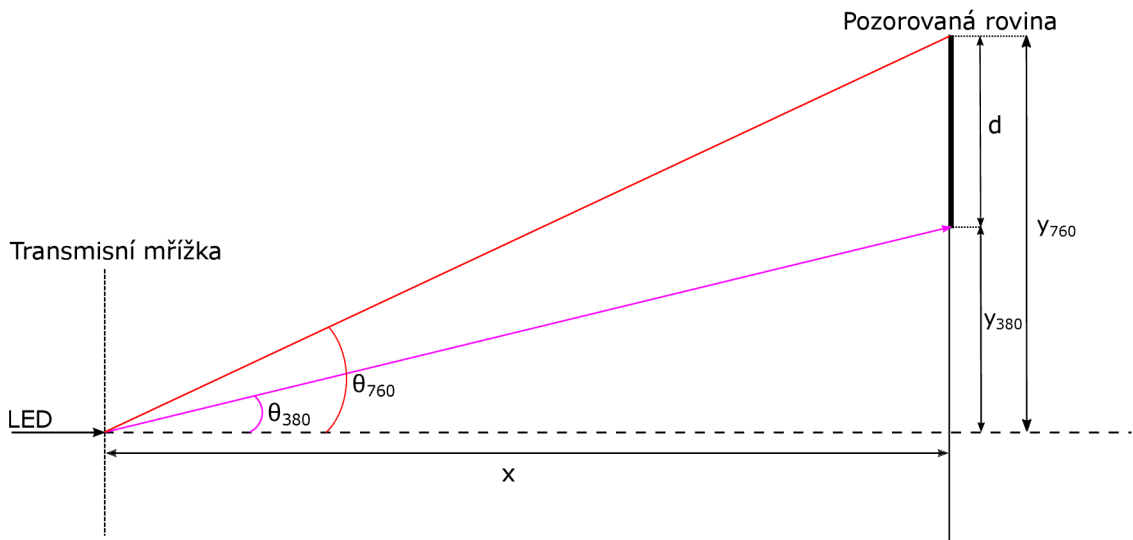
Vzdálenost paprsku o $\lambda = 380$ nm od středové osy:

$$y_{380} = b \cdot \tan(\theta_{380}) = 169,25 \cdot 10^{-3} \cdot \tan(13,179) = 42.08 \text{ mm} \quad (4.5)$$

Vzdálenost od středové osy pro paprsek $\lambda = 760$ nm pak bude:

$$y_{760} = y_{380} + d = 42,08 \cdot 10^{-3} + 50 \cdot 10^{-3} = 92.08 \text{ mm} \quad (4.6)$$

Celé viditelné spektrum se rozkládá mezi λ_{380} a λ_{780} , tedy na 400 nm. Kvůli omezení plynoucího ze vztahu 3.9 je nutné interval měření zkrátit, protože druhé maximum λ_{380} se šíří pod totožným úhlem jako λ_{760} .



Obr. 4.7: Nákres pro výpočet vzdáleností na pracovišti (nakresleno v Inkscape)

4.3 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 **čelní 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 **blokový 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.

4.3.1 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 [25]. 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 momentálně aktivním kanálu 60 mA, provedeme to následovně: `:CURR 0.06` [29].

4.3.2 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 prostředí. 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. Některé 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 textových řetězců vypsány v souboru `Ophir User Commands.pdf`. Oba textové soubory jsou zahrnuty při instalaci `StarLab` [26].

4.3.3 Uživatelské rozhraní

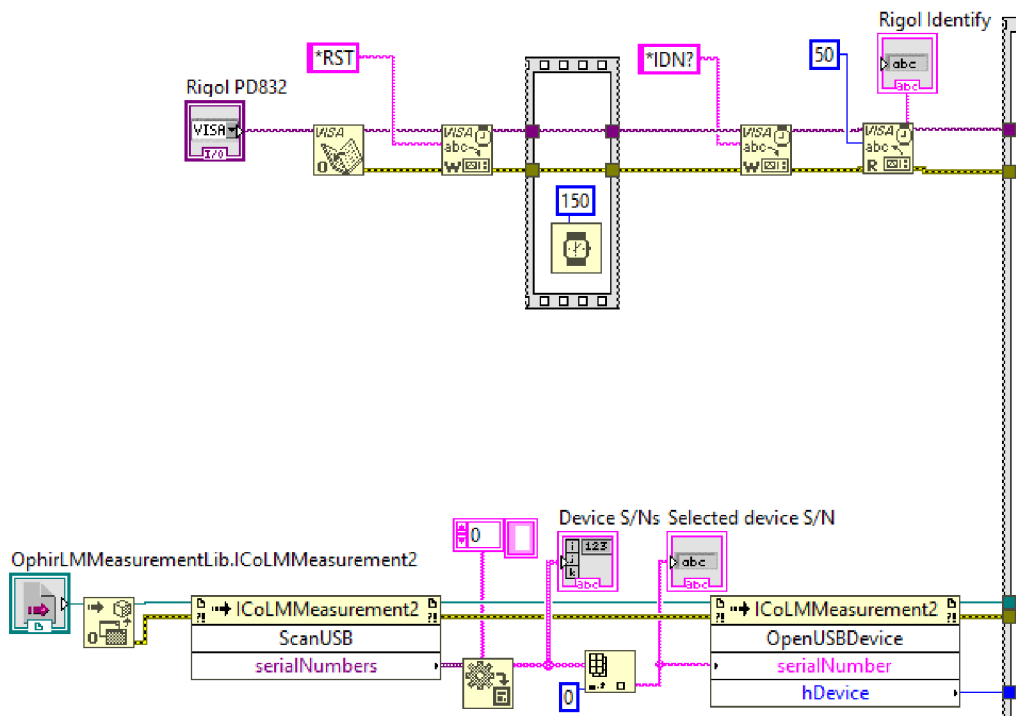
Uživatelská aplikace v LabVIEW se skládá ze tří částí. V levé horní části oddělené čarou se nachází indikátory navázání komunikace s přístroji. Pod čarou je oddíl, kde uživatel vybírá, kterou LED chce měřit, nastavuje napětí a proud napájecímu zdroji a spouští měření. V pravé části je graf, který automaticky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

4.3.4 Důležité části blokového diagramu

Navázání komunikace s přístroji

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

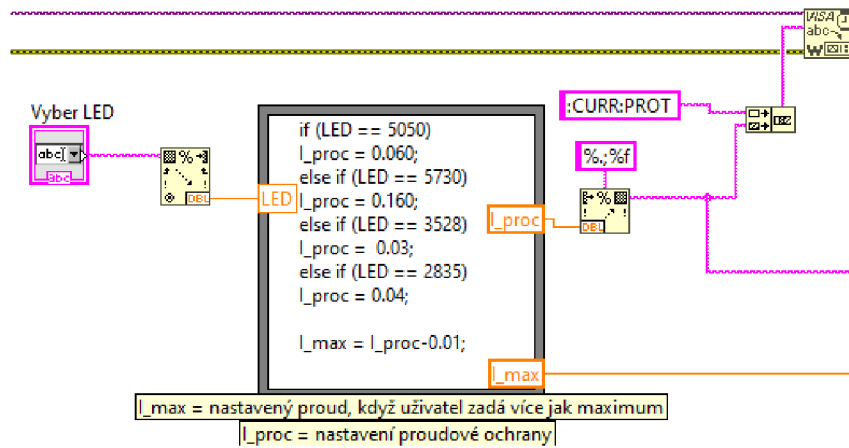
V dolní větvi funkce Automation Open získá z přiřazené knihovny referenční číslo, nebo-li refnum. Na základě tohoto čísla program otevře referenci na ActiveX Object a vyhledá na základě reference zařízení od značky Ophir. Vyhledávání má na výstupu datový typ variant. O jaký datový typ jde je specifikováno v referenci. Tato data jsou tedy přeložena do textových řetězců a vypsaný 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. 4.8: Navázání komunikace

Výběr LED a nastavení proudové ochrany

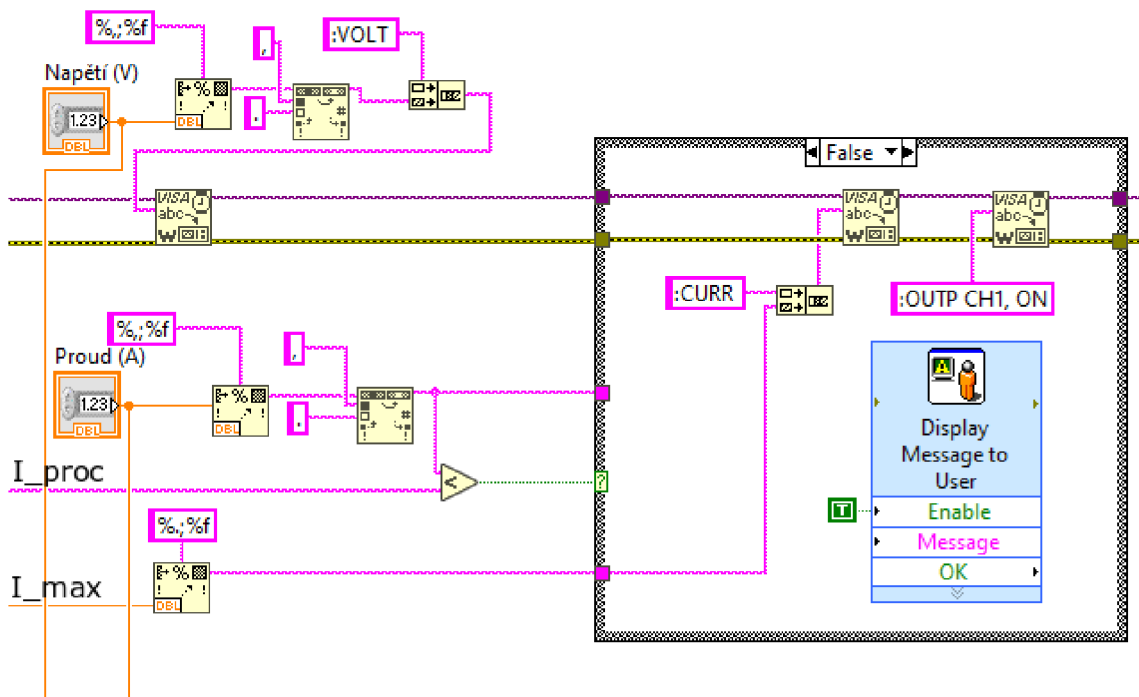
Po spuštění programu uživatel vybere z nabídky LED. Na základě výběru se na zdroji nastaví proudová ochrana pomocí proměnné I_proc na hodnotu mírně vyšší, než maximální provozní proud. Ochrana je nastavena na nižší hodnotu, než je peak hodnota uvedená výrobcem.



Obr. 4.9: 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 desetinou tečku, je potřeba čárku nahradit pomocí metody Search and Replace String a hodnotu poté složit pomocí Concatenate String s SCPI příkazem pro nastavení hodnot.



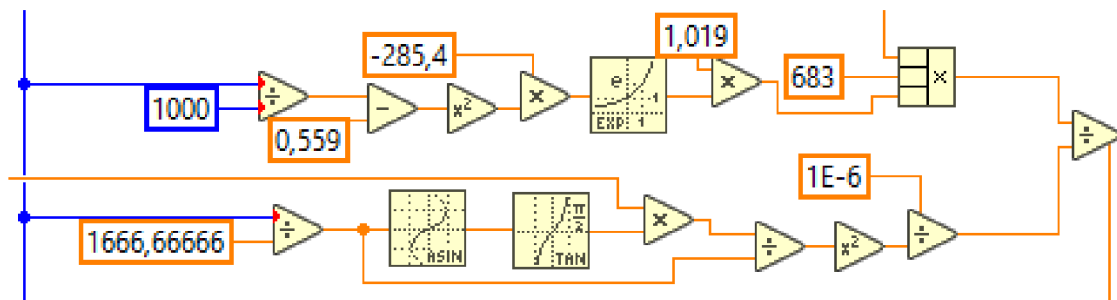
Obr. 4.10: Nastavení hodnot napájecího zdroje

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.

Přepočet optického výkonu na svítivost

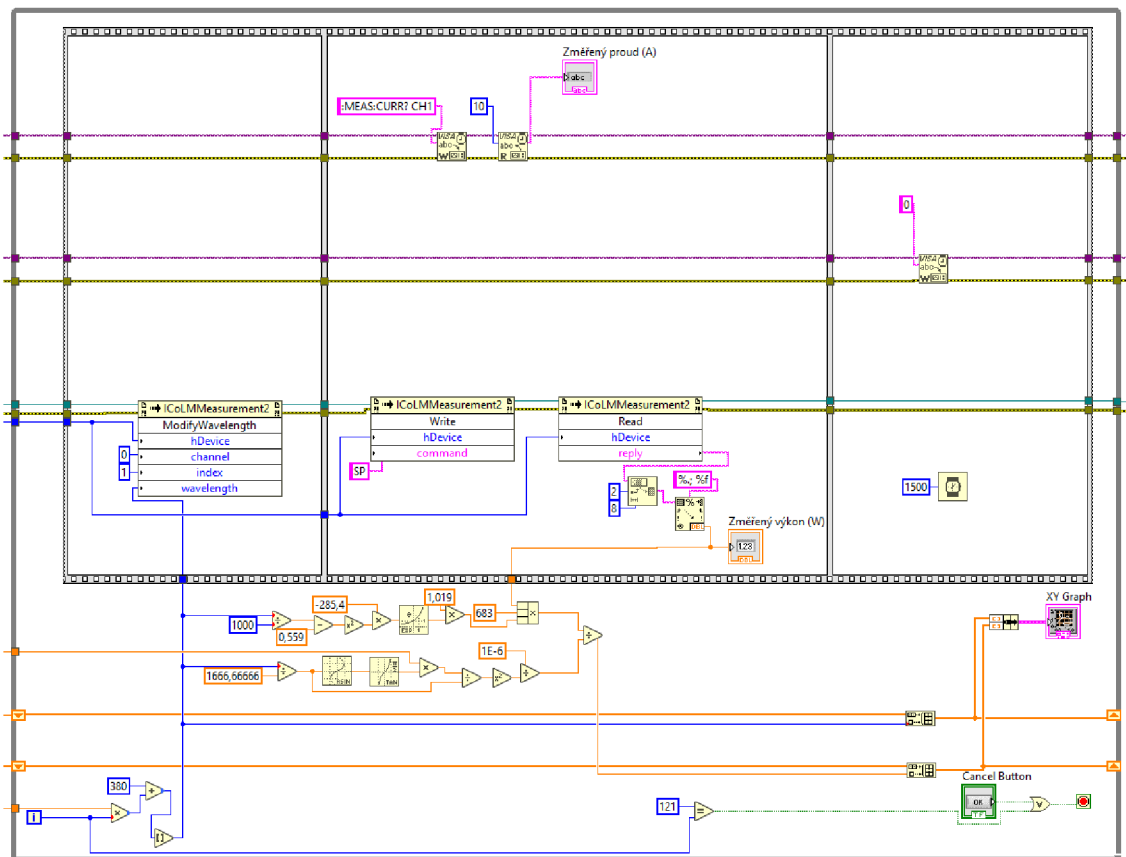
Tato konstrukce přepočítává v každém kroku optický výkon na svítivost. Horní část vypočítává s aktuální vlnovou délkou světelný tok podle vztahu 1.7. Dolní část vypočítává na základě vlnové délky prostorový úhel, aby následným dělením podle 1.10 byla zanešena svítivost v závislosti na vlnové délce do grafu



Obr. 4.11: Přepočet na svítivost

Měřicí smyčka

Smyčka je utvořena jako while cyklus, s vnořenou sekvenční strukturou. Ve while cyklu se s každým krokem vypočítává hodnota citlivosti na vlnovou délku na kterou se Vega přenastaví na začátku měřicího cyklu. V sekvenční struktuře se jako první krok přenastaví na daném indexu citlivost senzoru na vlnovou délku danou iterací vnějšího while cyklu a změny vlnové délky na kroku. V druhém kroku je poslán metodou příkaz **SP** a následně vyčten řetězec ve tvaru “* 1.000E-1”, oříznut o první dva znaky a matematikou přepočítán na svítivost. Zároveň je svorkami napájecího zdroje měřen proud a indikován v uživatelském rozhraní. Graf funguje na principu posuvného registru a generuje se s každou iterací vnějšího while cyklu. Ve třetím kroku je přes sériovou linku poslán řetězec “0” pro arduino, což je v programu arduino přečteno a posuv udělá daný počet kroků.



Obr. 4.12: Měřicí smyčka

4.4 Arduino kód

```

const int stepPin = 8;
const int dirPin = 9;
int state = 2;
#define koncak 2 //D2

void setup() {
    pinMode(stepPin, OUTPUT);
    pinMode(dirPin, OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
    while (!Serial) {
        ; // nic se nedeje, protože port není dostupný
    }
    // najetí do výchozí pozice
    if (digitalRead(koncak) == HIGH)
    {

```

```

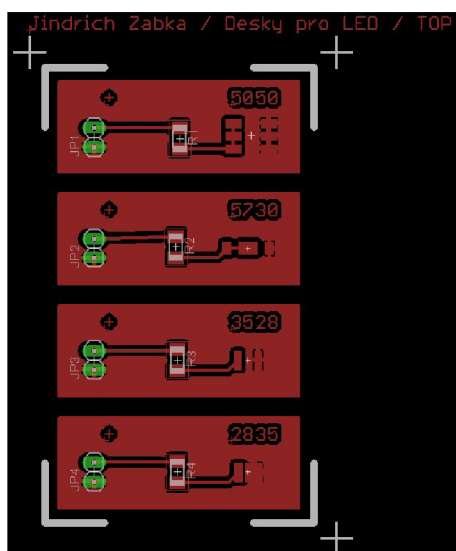
        navrat();
    }
}
void loop()
{
    if(Serial.available()>0){
        state=Serial.parseInt();
        switch(state){
        case 0:
            digitalWrite(dirPin,LOW); //LOW = směr od výchozí polohy
                // 200 pulzů pro celé otočení
            for(int x = 0; x < 2; x++) {
                digitalWrite(stepPin,HIGH);
                delay(10);
                digitalWrite(stepPin,LOW);
                delay(10);
            }
        case 1:
            navrat();
            break;
        }
    }
}
void navrat()
{
    digitalWrite(dirPin,HIGH);
    while(digitalRead(koncak) == HIGH) {
        digitalWrite(stepPin,HIGH);
        delay(10);
        digitalWrite(stepPin,LOW);
        delay(10);
    }
}

```

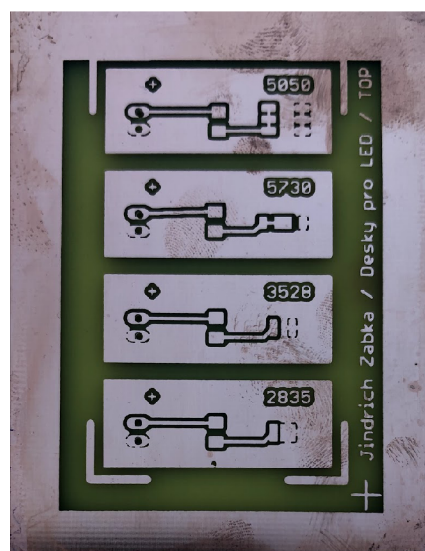
4.5 Desky plošných spojů pro LED

Pro oživení diod byly navrženy 4 malé desky v prostředí programu EAGLE 7.2.0. Každé LED byla vytvořena knihovna s pouzdem 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. 4.13: (a) Schéma desky (b) Deska

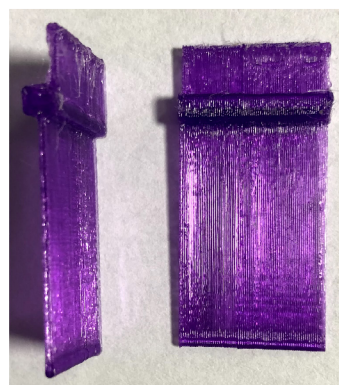
Kvůli malým rozměrům byly navržnuty ve volně stáhnutelném programu Tinkercad a vytisknuty na 3D tiskárně jednoduché násady, díky kterým lze desky upevnit do držáku, který je k dispozici v laboratoři, vždy do stejné polohy pro všechny desky.



(a)



(b)

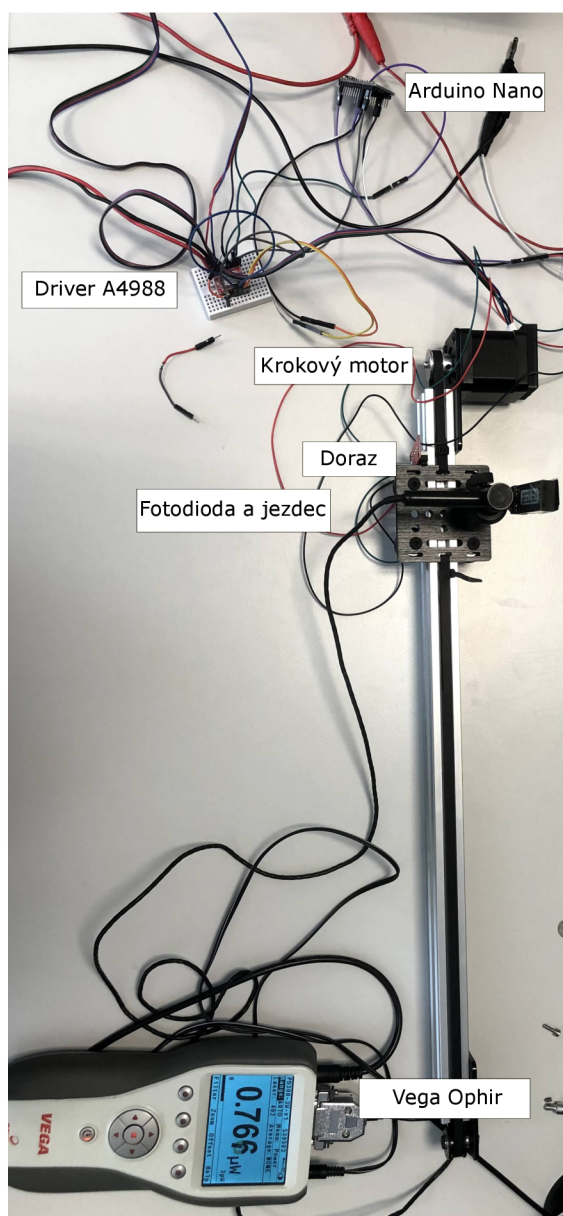


(c)

Obr. 4.14: (a)(b) Náhledy na 3D objekt (c) Reálný objekt

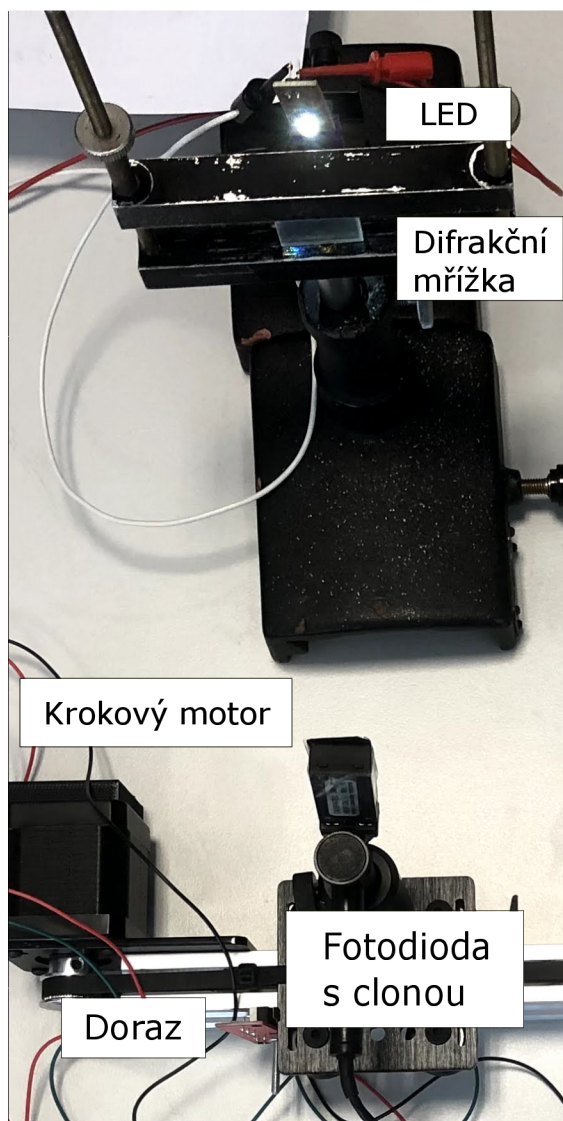
4.6 Sestavené pracoviště

V horní části obrázku vidíme Arduino Nano, propojující počítač, driver a dorazový spínač. Nad Arduinem bychom viděli napájecí zdroj a počítačové pracoviště. Driver A4988 je usazen do nepájivého pole kvůli snadnějšímu zapojení.



Obr. 4.15: Pracoviště

Z druhého úhlu vidíme v horní části desku s LED usazenou v držáku a mířící k difrakční mřížce. Lineární pojezd leží v odměřené vzdálenosti ve výchozí poloze. Při bližším pohledu lze vidět, že na aperturu fotodiody byla připevněna clona s dírou o rozměrech $\approx 1 \times 1$ mm. Při měření se bude jezdec pohybovat z tohoto pohledu doprava.



Obr. 4.16: Pracoviště

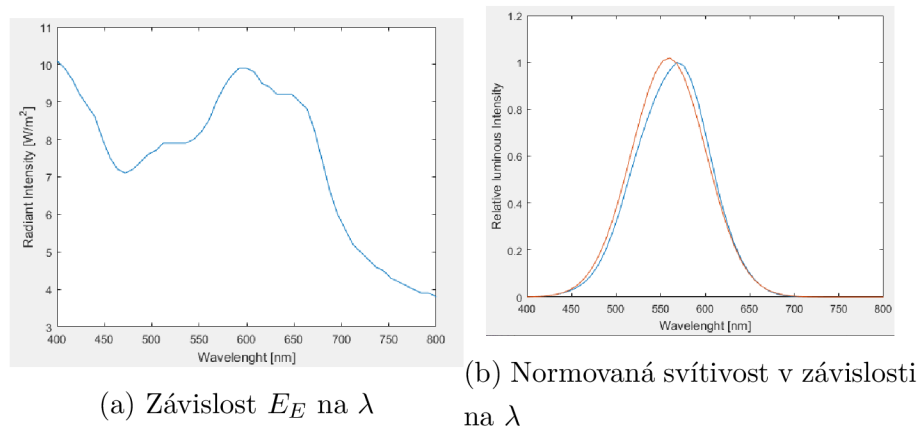
4.7 Postup měření

Měření v programu se odehrává v následujících krocích:

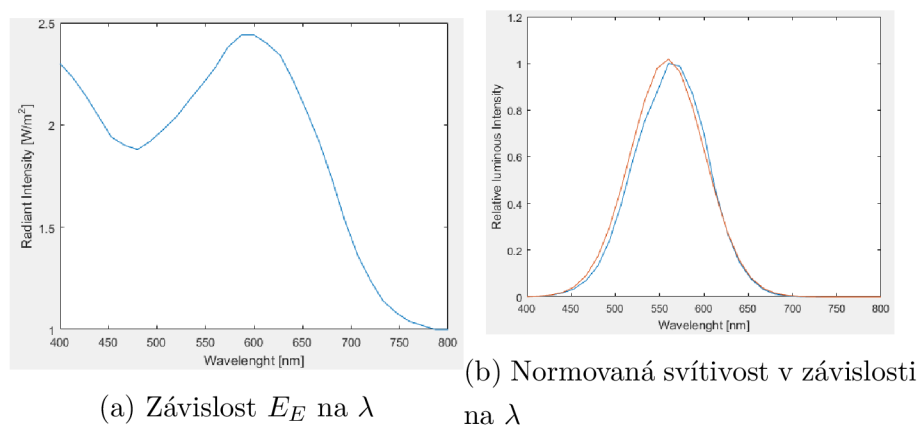
1. Upevněte DPS s osazenou LED do násady v držáku a připojte svorky, polarita je naznačena na desce
2. Po spuštění programu LedMeasure.exe vyberte číslo LED, které je napsané na desce. Nastavte požadované napětí a proud.
3. Stiskněte tlačítko Spustit. Jezdec se začne posouvat po krocích. Vyčkejte než proběhne naměření celé charakteristiky, jezdec se vrátí do původní polohy.
4. Pravým tlačítkem myši klikněte na graf, zvolte Export Data To Excel a Export Simplified Image...
5. Opakujte pro všechny DPS

4.8 Naměřené hodnoty

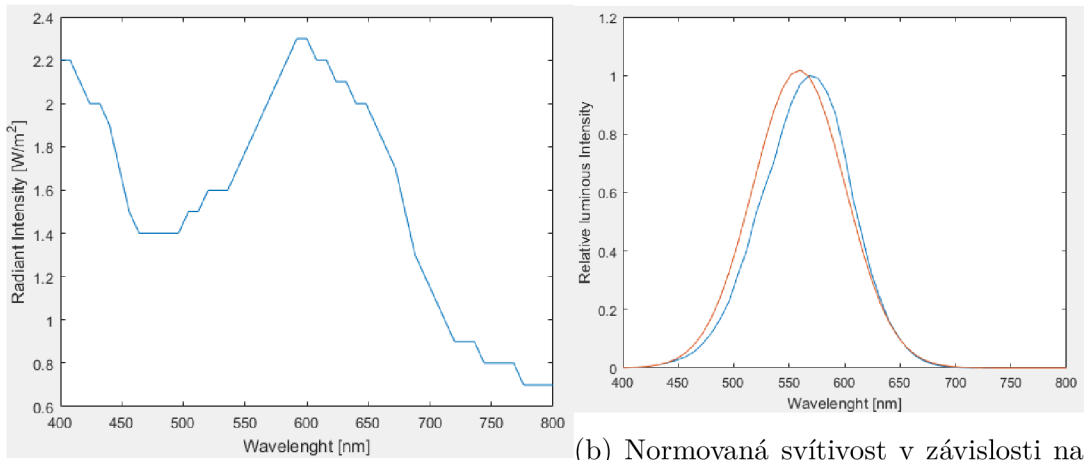
Nejspíše z důvodu chyby v softwaru se nepodařilo automatickým posunem odměřit spektra diod. Z tohoto důvodu jsou použity naměřená data z dřívější verze softwaru s mechanickým posuvem jezdce s fotodiodou. Tyto závislosti jsou měřeny na intervalu $400 \div 800$ nm, tudíž jsou na kraji limitace udané v 3.9. Hodnoty byly snímány bez clony se zmenšenou aperturou a tak jsou zkresleny interferenčními maximy okolních vlnových délek. 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 λ , na grafech (b) závislost normované svítivosti na λ . Modrou barvou graf z výpisu níže a červenou funkce zobrazená na Obr. 1.4.



Obr. 4.17: Závislosti pro pouzdro 5730



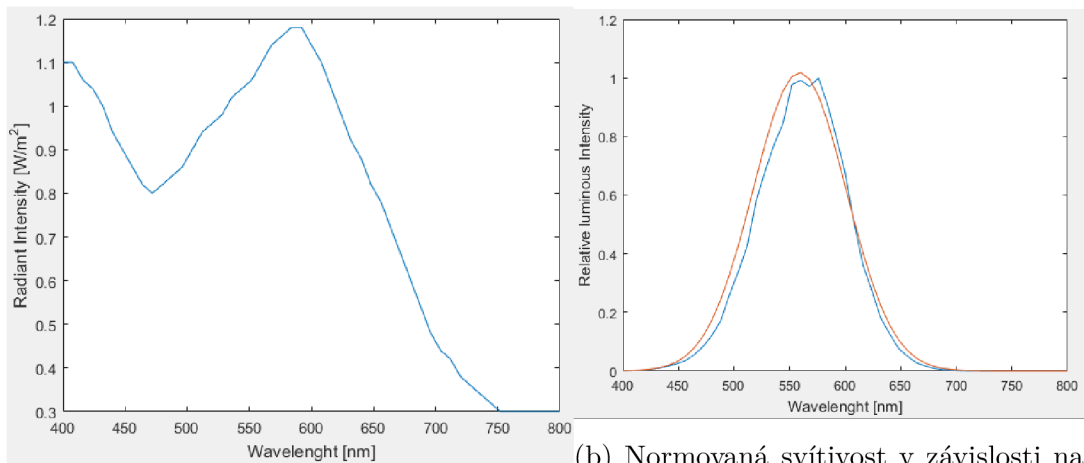
Obr. 4.18: Závislosti pro pouzdro 5050



(a) Závislost E_E na λ

(b) Normovaná svítivost v závislosti na λ

Obr. 4.19: Závislosti pro pouzdro 2835



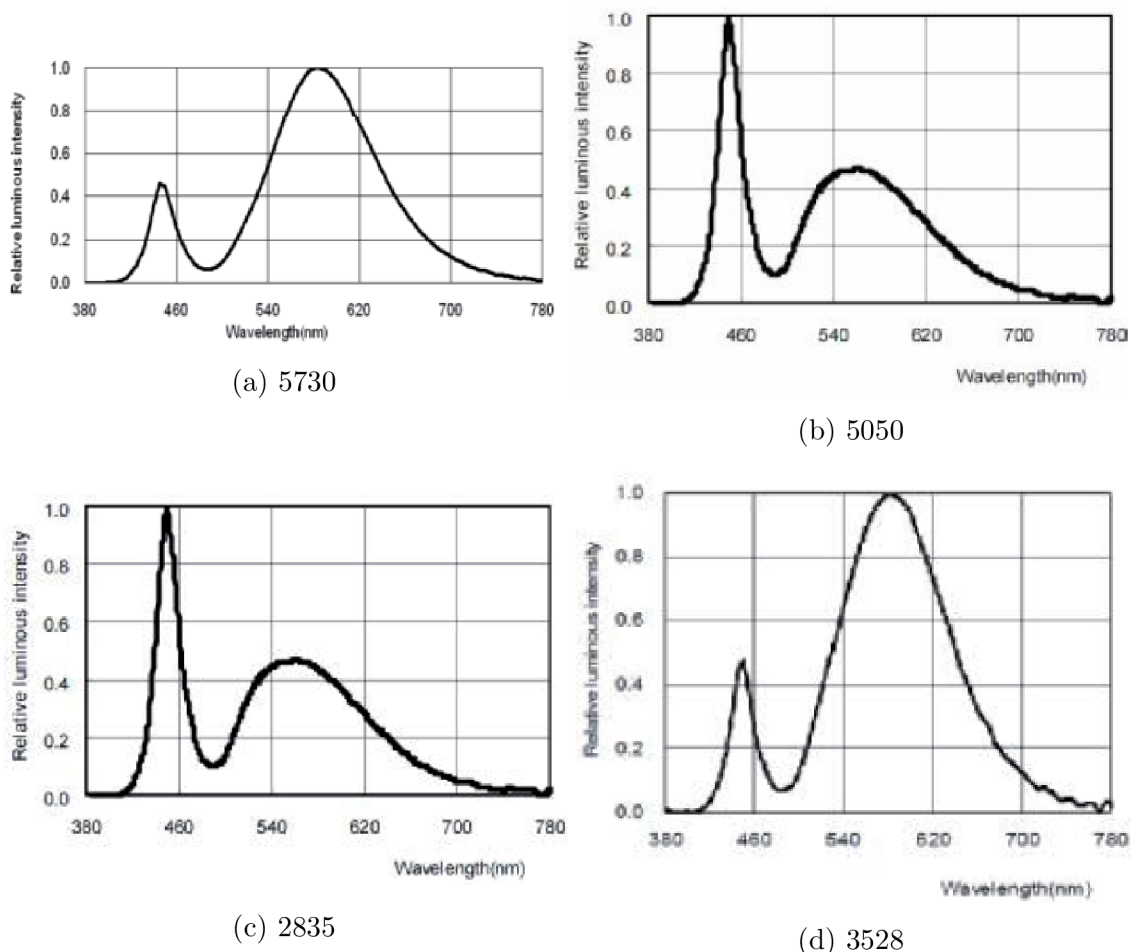
(a) Závislost E_E na λ

(b) Normovaná svítivost v závislosti na λ

Obr. 4.20: Závislosti pro pouzdro 3528

5 Porovnání s katalogovými listy

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



Obr. 5.1: Referenční měření z katalogových listů [14]

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. Software k pracovišti byl vytvořen v prostředí LabVIEW, který přes sběrnici USB komunikuje s napájecím zdrojem, měřičem optického výkonu a Arduino Nano. Byla vytvořena spustitelná aplikace LedMeasure.exe, která umí po spuštění automaticky otevřít komunikaci s přístroji. Při zadávání parametrů jsou ošetřeny vstupy proti uživatelským chybám. Pravou část uživatelské aplikace zabírá graf, který se generuje s každým krokem programu.

Posuvná dráha s motorem NEMA nebyla v konečném projektu využita kvůli softwarové chybě, která se při předchozím testování neprojevila. Posuv na kterém tak byla umístěna fotodioda, byla vypůjčena z optické laboratoře, ale nebyla zprovozněna automatizovaně a musela se tedy posouvat manuálně. Jelikož posuvné zařízení, které bylo k dispozici, mělo dráhu posuvu pouze 5.8 cm, byla na toto omezení aplikace uzpůsobena.

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

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 pouzdem 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] *Difrakce* [online]. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <http://fu.mff.cuni.cz/semicond/media/files/courses/kapitola-6-difrakce-text-18-12-19_AASpJEm.pdf>.
- [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] *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>>.
- [13] *Physical Limitation of Phosphors* [online]. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <<https://www.nature.com/articles/s41598-018-20883-3>>.

- [14] *GM Electronic* [online]. Dostupné z: <<https://www.gme.cz/>>.
- [15] ČERNOCH, A., MACHULKA, R. a SOUBUSTA, J. *Optická spektroskopie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3114-7.
- [16] *Lom hranolem* [online]. [cit. 2021-08-04]. Dostupné z: <http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Lom_hranolem.pdf>.
- [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] WILFERT, O. *Optoelektronika*. Brno: Skriptum VUT, 155s.
- [21] HOLLAS, J. Michael. *Modern spectroscopy*. 4th ed. Chichester: John Wiley, 2004. ISBN 0470844167.
- [22] *Charge-Coupled Devices* [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <<https://www.microscopyu.com/digital-imaging/introduction-to-charge-coupled-devices-ccds>>.
- [23] KLÍČ, Alois, Miroslava DUBCOVÁ a Karel VOLKA *Fourierova transformace: S příklady z infračervené spektroskopie*. Vyd. 3. Praha: VŠCHT, 2002. ISBN 978-80-7080-478-0.
- [24] *Fabry-Perot Interferometers* [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <<https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/fabry-perot-interferometers>>.
- [25] Batronix *Rigol DP832* [online]. <<https://www.batronix.com/shop/power-supplies/DP832.html>>.
- [26] 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>.

- [27] *NEMA 17* [online]. <<https://datasheetspdf.com/datasheet/17HD48002-22B.html>>.
- [28] *A4988 pinout* [online]. <<https://lastminuteengineers.com/wp-content/uploads/arduino/A4988-Stepper-Motor-Driver-Pinout.png>>.
- [29] 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

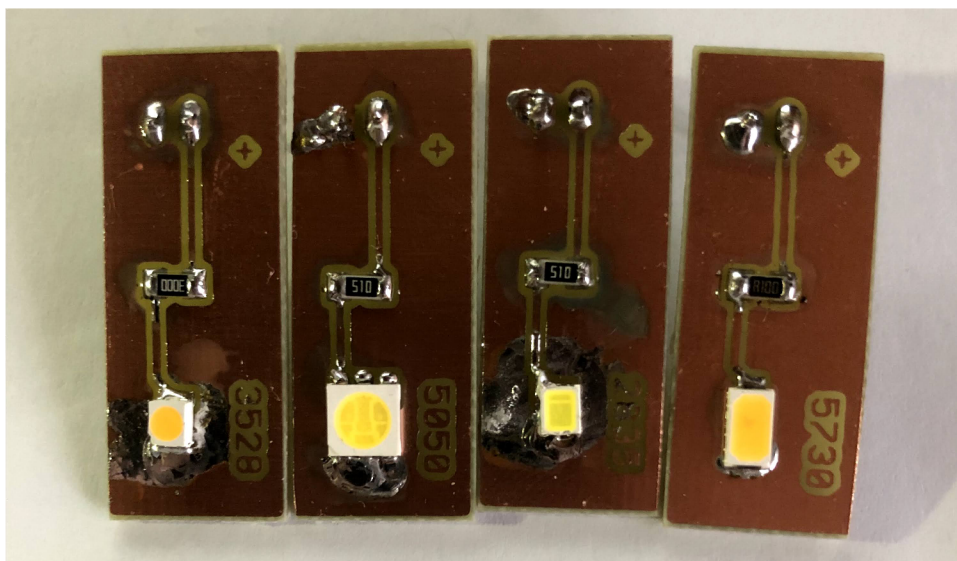
A	Uživatelské rozhraní aplikace	59
B	Osazené DPS a seznam součástí	60
	B.1 Seznam součástí	60
C	Obsah přiloženého ZIP souboru	61

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
```