

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh RGB-LED světelného zdroje

Vedoucí práce: Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

Zpracoval: Bc. Jan Korunka

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan KORUNKA**
Osobní číslo: **E10N0175P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Návrh LED-RGB světelného zdroje**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


Návrhněte LED-RGB světelný zdroj dle následujících zásad:

1. Zpracujte přehled světelných diod - princip vzniku záření a jeho případnou transformaci do oblasti viditelného světla.
2. Vyhodnoťte vlastnosti jednotlivých diod principiálně popsanych v předešlém bodě, zejména z pohledu spektrálních charakteristik.
3. Sestrojte vlastní experimentální prototyp světelného zdroje na principu skládání světelných diod RGB s možností měnit podíl jednotlivých složek.
4. Na sestaveném modelu proveďte pro různá nastavení měření spektrálních charakteristik a náhradní teploty chromatičnosti.
5. Vyhodnoťte vlastnosti modelu světelného zdroje z hlediska charakteristik vyzařovaného světla.


Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. **Linda, J. : Elektrické světlo 1., 2.**
2. **Habel, J. : Světelná technika**

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie
Konzultant diplomové práce: **Tomáš Maixner**
Siteco Lighting, spol. s r.o.
Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce zpracovává přehled světelných diod. Vyhodnocuje možnosti vytvoření bílého zdroje pomocí LED diod. Předkládá modelové možnosti zdrojů bílého světla pomocí LED-RGB.

Klíčová slova

LED, LED-RGB, LD, OLED, teplota chromatičnosti, Ra index podání barev, aditivní míchání barev, trichromatická soustava, elektroluminiscence, rekombinace

Abstract

This dissertation presents overview of LEDs. Evaluate options for a source using white LEDs. Model presents the possibility of white light sources with LED RGB.

Key words

LED, RGB LED, LD, OLED, color temperature, color rendering index Ra, additive color mixing, trichromatic systém, electroluminescence, recombination

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 11.5.2012

Bc. Jan Korunka

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Karlu Noháčovi Ph.D. a Ing. Tomáši Maixnerovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále děkuji Ing. Tomáši Křenkovi za velmi vstřícný přístup a zapůjčení spektroskopu Red Tipe USB650 UV. Děkuji p. Jakubovi Brandalíkovi, majiteli firmy Lighway, za ochotné poskytnutí světlovodných tubusů.

Obsah

OBSAH.....	8
1 ÚVOD	14
2 HISTORIE.....	15
2.1 1907 – OBJEV FOTO-LUMINISCENCE (PRVNÍ SVĚTLO-EMITUJÍCÍ DIODA).....	15
2.2 1962 - INFRAČERVENÉ A ČERVENÉ LED	16
2.3 1972 – 1993 – VZNIK MODRÉ A ZELENÉ SVĚTLO-EMITUJÍCÍ DIODY	17
2.4 1995 – BÍLÉ SVĚTLO-EMITUJÍCÍ DIODY	18
3 PŘEHLED SVĚTELNÝCH DIOD.....	19
3.1 ZÁKLADNÍ OBECNÝ PRINCIP LED	19
3.1.1 Zapojení v závěrném směru	20
3.1.2 Zapojení v propustném směru	21
3.2 KONVERTOR VLNOVÝCH DÉLEK	24
3.3 ADITIVNÍ MÍCHÁNÍ BAREV	25
3.4 DOPLŇUJÍCÍ	27
3.4.1 OLED – Organic Light Emmiting Diode	27
3.4.2 Laserové diody.....	29
4 PARAMETRY A TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI DIOD LED	31
4.1 3.3 MĚRNÝ VÝKON DIOD LED	31
4.2 OPTICKÉ VLASTNOSTI	33
4.2.1 Záření	33
4.2.2 Vjem barvy.....	34
4.2.3 Trichromatické soustavy	37
4.2.4 Index podání barev (Ra).....	40
4.3 OSTATNÍ DOPLŇUJÍCÍ INFORMACE O LED	40
5 VLASTNÍ MODELY	41
5.1 KONSTRUKCE PROTOTYPŮ	41
5.1.1 S použitím LED-RGB	41
5.1.2 S použitím polopropustných zrcadel	43
5.1.3 S použitím osmi vlnových délek	44
5.2 MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍCH CHARAKTERISTIK.....	48
5.2.1 Spektrometr: „Red Tide USB650 UV“	48
Barevné schopnosti v SpectraSuite	50
Peak metriky v SpectraSuite	50
5.3 MĚŘÍCÍ KOMPONENT.....	51
5.4 S POUŽITÍM LED-RGB	52
5.4.1 Bez použití optického nástavce.....	52
5.4.2 Bodový optický nástavec	53
5.4.3 Difuzní optický nástavec	55
5.4.4 Pruhovaný optický nástavec	57
5.4.5 Optický nástavec s vyzařovacím úhlem 15°	59
5.4.6 Vlastní optický nástavec	61
5.5 S POUŽITÍM POLOPROPUSTNÝCH ZRCADEL.....	63
5.6 S POUŽITÍM OSMI VLNOVÝCH DÉLEK	65
6 MĚŘENÍ TEPLoty CHROMATIČNOSTI.....	67
7 ZÁVĚR	69

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	73
PŘÍLOHY	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

Seznam obrázků

OBR. 2.1 HENRY JOSEPH ROUND (PŘEVZATO Z [20]).....	15
OBR. 2.2 OLEG VLADIMIROVICH LOSEV (PŘEVZATO Z [21]).....	16
OBR. 2.3 NICK HOLONYAK (PŘEVZATO Z [32])	17
OBR. 2.4 EMISNÍ SPEKTRUM BÍLÉ SVĚTLO-EMITUJÍCÍ DIODY VYROBENÉ SPOLEČNOSTÍ NICHIA CHEMICAL INDUSTRIES (ANAN, TOKUSHIMA, JAPONSKO), PŘEVZATO Z [2].....	18
OBR. 3.1 DIODA –PŘEVZATO [9].....	19
OBR. 3.2 DIODA V ZÁVĚRNÉM SMĚRU - PŘEVZATO [9].....	20
OBR. 3.3 DIODA V PROPUSTNÉM SMĚRU - PŘEVZATO [9]	21
OBR. 3.4 UKÁZKA VYTVOŘENÍ FOTONU V NP PŘECHODU (PŘEVZATO Z[1])	22
OBR. 3.5 EMISNÍ SPEKTRUM BÍLÉ LED - LUMINOFOR BUZENÝ SVĚTLEM MODRÉ DIODY (PŘEVZATO Z [11])	24
OBR. 3.6 EMISNÍ SPEKTRUM BÍLÉ LED - TŘÍPÁSMOVÝ LUMINOFOR BUZENÝ ZÁŘENÍM UV DIODY (PŘEVZATO Z [11]).....	24
OBR. 3.7 EMISNÍ SPEKTRUM BÍLÝCH SVĚTELNÝCH DIOD S RŮZNOU TEPLOTOU CHROMATIČNOSTI (PŘEVZATO Z [19]).....	25
OBR. 3.8 DOKONALE SMÍCHANÉ BARVY ČERVENÉ, ZELENÉ A MODRÉ (PŘEVZATO Z [18])	25
OBR. 3.9 PRINCIP OLED (PŘEVZATO Z [24])	27
OBR. 3.10 ROZDÍL MEZI BODOVÝM (VLEVO) A CELOPLOŠNÝM (VPRAVO) OSVĚTLENÍM (PŘEVZATO Z [24]).....	28
OBR. 3.11 SROVNÁNÍ EFEKTIVITY LED SE ZÁKLADNÍMI SVĚTELNÝMI ZDROJI (PŘEVZATO Z [23])	29
OBR. 3.12 UKÁZKA ZRNĚNÍ LD (PŘEVZATO Z [23]).....	30
OBR. 4.1 ZVYŠOVÁNÍ MĚRNÉHO VÝKONU BAREVNÝCH LED V PRŮBĚHU NĚKOLIKA POSLEDNÍCH DESETILETÍ (PŘEVZATO Z [12])	31
OBR. 4.2 EMISNÍ SPEKTRUM VYBRANÝCH BAREVNÝCH LED (PŘEVZATO Z [11])	32
OBR. 4.3 LED FIRMY CREE 254LM/W (PŘEVZATO Z [26])	32
OBR. 4.4 SPEKTRUM ELEKTROMAGNETICKÝCH ZÁŘENÍ S ORIENTAČNÍM (PŘEVZATO Z [14]).....	33
OBR. 4.5 ROZLOŽENÍ BAREVNÝCH TÓNŮ VE SPEKTRÁLNÍ OBLASTI VIDITELNÉHO ZÁŘENÍ (PŘEVZATO Z [14])	34
OBR. 4.6 TEPLOTA CHROMATIČNOSTI (PŘEVZATO Z [16]).....	36
OBR. 4.7 SPEKTRÁLNÍ PRŮBĚHY KOLORIMETRICKÝCH KOEFICIENTŮ TRICHROMATICKÉ (PŘEVZATO Z [15]).....	36
OBR. 4.8 ZNÁZORNĚNÍ PRINCIPU MÍŠENÍ TŘÍ ZÁKLADNÍCH (PŘEVZATO Z [15])	37
OBR. 4.9 PROSTOROVÉ ZNÁZORNĚNÍ BAREVNÝCH PODNĚTŮ V PROSTOROVÉ SOUSTAVĚ SOUŘADNIC (PŘEVZATO Z 16).....	38
OBR. 4.10 NÁČRT TROJÚHELNÍKU BAREV V PROSTOROVÉ SOUSTAVĚ SOUŘADNIC (PŘEVZATO Z [16]).....	38
OBR. 4.11 KOLORIMETRICKÝ TROJÚHELNÍK (PŘEVZATO Z [16])	39
OBR. 5.1 FOTKA LED-RGB (PŘEVZATO Z [27])	41
OBR. 5.2 ROZLOŽENÍ VÝSTUPŮ NA CHLADÍCÍ PLOŠCE (PŘEVZATO Z [29]).....	42
OBR. 5.3 FOTKA ŘÍZENÍ RGB PÁSKU S OVLADAČEM	42
OBR. 5.4 APLIKACE ŘÍZENÍ NA LED-RGB	42
OBR. 5.5 NÁVRH ROZLOŽENÍ DIOD VŮČI POLOPROPUSTNÝM ZRCADLŮM.....	43
OBR. 5.6 NÁHLED ROZLOŽENÍ KOMPONENTŮ	44
OBR. 5.7 PWM KONTROLÉR	44
OBR. 5.8 KOVOVÁ DESKA PŘI VRTÁNÍ.....	45
OBR. 5.9 KOVOVÁ DESKA S LED DIODAMI	45
OBR. 5.10 DESKA PLOŠNÉHO SPOJE ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY (8x PWM).....	46
OBR. 5.11 UKÁZKA DRÁTOVÁNÍ A PÁJENÍ.....	46
OBR. 5.12 FINÁLNÍ VÝROBEK 8xPWM	47
OBR. 5.13 SPEKTROMETR RED TIDE USB650 UV	48
OBR. 5.14 LOGO SPECTRA SUITE SOFTWARE (PŘEVZATO Z [30])	49
OBR. 5.15 MĚŘÍCÍ KOMPONENT	51
OBR. 5.16 LED-RGB BEZ NÁSTAVCE INTEGRAČNÍ ČAS 8MS	52
OBR. 5.17 LED-RGB BEZ NÁSTAVCE INTEGRAČNÍ ČAS 60MS	52
OBR. 5.18 BODOVÝ OPTICKÝ NÁSTAVEC (PŘEVZATO Z [27])	53
OBR. 5.19 SPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKA LED-RGB S BODOVÝM OPTICKÝM NÁSTAVCEM (INTEGRAČNÍ ČAS 8MS).....	53
OBR. 5.20 FOTKA ROZLOŽENÍ BAREV PŘI POUŽITÍ BODOVÉHO OPTICKÉHO NÁSTAVCE	54
OBR. 5.21 DIFUZNÍ OPTICKÝ NÁSTAVEC (PŘEVZATO Z [27])	55
OBR. 5.22 SPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKA LED-RGB S DIFUZNÍM OPTICKÝM NÁSTAVCEM (INTEGRAČNÍ ČAS 8MS).....	55
OBR. 5.23 FOTKA ROZLOŽENÍ BAREV PŘI POUŽITÍ DIFUZNÍHO OPTICKÉHO NÁSTAVCE	56

OBR. 5.24 PRUHOVANÝ OPTICKÝ NÁSTAVEC (PŘEVZATO Z[27])	57
OBR. 5.25 SPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKA LED-RGB S PRUHOVANÝM OPTICKÝM NÁSTAVCEM (INTEGRAČNÍ ČAS 8MS)	57
OBR. 5.26 FOTKA ROZLOŽENÍ BAREV PŘI POUŽITÍ BODOVÉHO OPTICKÉHO NÁSTAVCE	58
OBR. 5.27 OPTICKÝ NÁSTAVEC S VYZAŘOVACÍM ÚHLEM 15° (PŘEVZATO Z [27])	59
OBR. 5.28 SPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKA LED-RGB S ÚHLEM VYZAŘOVÁNÍ 15° (INTEGRAČNÍ ČAS 8MS)	59
OBR. 5.29 SPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKA LED-RGB S ÚHLEM VYZAŘOVÁNÍ 15° (INTEGRAČNÍ ČAS 3MS)	60
OBR. 5.30 FOTKA ROZLOŽENÍ BAREV PŘI POUŽITÍ S ÚHLEM VYZAŘOVÁNÍ 15°	60
OBR. 5.31 POUŽITÁ LUPA (PŘEVZATO Z[31]).....	61
OBR. 5.32 SPEKTRUM PŘI POUŽITÍ VLASTNÍHO OPTICKÉHO NÁSTAVCE (INTEGRAČNÍ ČAS 31MS)	61
OBR. 5.33 FOTKA ROZLOŽENÍ BAREV PŘI POUŽITÍ VLASTNÍHO NÁSTAVCE.....	62
OBR. 5.34 FOTKA ROZLOŽENÍ BAREV PŘI POUŽITÍ VLASTNÍHO NÁSTAVCE S PŘEKÁŽKOU	62
OBR. 5.35 SPEKTRUM PŘI POUŽITÍ POLOPROPUSTNÝCH ZRCADEL (INTEGRAČNÍ ČAS 80MS)	63
OBR. 5.36 FOTKA ROZLOŽENÍ BAREV PŘI POUŽITÍ POLOPROPUSTNÝCH ZRCADEL S PŘEKÁŽKOU	64
OBR. 5.37 SPEKTRUM PŘI POUŽITÍ OSMI VLNOVÝCH DÉLEK (INTEGRAČNÍ ČAS 41MS)	65
OBR. 5.38 OSM VLNOVÝCH DÉLEK BEZ OPTICKÉHO NÁSTAVCE	65
OBR. 5.39 OPTICKÉ NÁSTAVCE A ZOBRAZENÍ JEJICH PŮSOBENÍ NA OPTICKÉ ZÁŘENÍ	66
OBR. 5.40 RUKA JAKO PŘEKÁŽKA DOKAZUJÍCÍ EXISTENCI ZDROJE SLOŽENÉHO Z VĚTŠÍHO POČTU MONOCHROMATICKÝCH ZDROJŮ.....	67
OBR. 6.1 NAMĚŘENÁ TEPLOTA CHROMATIČNOSTI PŘI NASTAVENÍ LED-RGB ZDROJE NA CHLADNĚ BÍLÝ TÓN	68
OBR. 6.2 NAMĚŘENÁ TEPLOTA CHROMATIČNOSTI PŘI NASTAVENÍ LED-RGB ZDROJE NA NEUTRÁLNĚ BÍLÝ TÓN.	68
OBR. 6.3 NAMĚŘENÁ TEPLOTA CHROMATIČNOSTI PŘI NASTAVENÍ LED-RGB ZDROJE NA TEPLĚ BÍLÝ TÓN.....	69

Seznam symbolů a zkratk

Ra	index podání barev [-]
Tc	náhradní teplota chromatičnosti[K]
Φ_{el}	spektrální hustota zářivého toku [-]
λ	vlnová délka [nm]
x (1931)	osa x chromatického diagramu z roku 1931
y (1931)	osa y chromatického diagramu z roku 1931
z (1931)	osa z chromatického diagramu z roku 1931
Ra	index podání barev
Φ_v	světelný tok
Φ_e	zářivý tok
v	světelná účinnost [lm]
Pm	měrný výkon [lm/W]
I _F	provozní (pracovní) ustálený proud diody v propustném směru
U _F	napětí na diodě v propustném směru
LED	Light-emitting diode - Světlo emitující dioda
LD	Laser diode - Laserová dioda
OLED	Organic light-emitting diode – Organická světlo emitující dioda
CIE	international commission on illumination - mezinárodní komise pro osvětlení
CRI	color rendering index – index podání barev Ra
EN	evropská norma
tzv.	tak zvaný
X, Y, Z	trichromatické složky popisovaného barevného podnětu v soustavě XYZ
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	trichromatické barevné činitele
lm	lumen

Seznam rovnic

$$E_g \approx |E_c - E_v| \approx h\nu \quad (3.1)$$

$$eU = h\nu \quad (3.2)$$

$$D_n = \frac{kT}{e} \mu_n D_p = \frac{kT}{e} \mu_p \quad (3.3)$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (3.4)$$

Seznam tabulek

TABULKA 1 ADAPTIVNÍ MÍCHÁNÍ BAREV (PŘEVZATO Z [13]).....	26
TABULKA 2 VLNOVÉ DÉLKY SPEKTRÁLNÍCH BAREV.....	35
TABULKA 3 PARAMETRY LED-RGB (PŘEVZATO Z [27]).....	41
TABULKA 4 SPECIFIKACE (PŘEVZATO Z[30]).....	49
TABULKA 5 TABULKA ZÁKLADNÍCH BAREVNÝCH TÓNŮ PODLE TEPLoty CHROMATIČNOSTI	67

1 Úvod

Diplomová práce pojednává o historii vývoje světlo-emitujících diod. Uvádí příklady možných variant konstrukcí bílých diod. Jak se v této práci dozvíte, jsou dvě hlavní teorie vytvoření bílého světla pomocí světlo-emitujících diod. Jeden z těchto přístupů jsme dle zadání použili k sestrojení experimentálního světelného zdroje s použitím LED barev a to červené, zelené a modré. Na tomto zdroji změříme a zhodnotíme spektrální charakteristiky. Začátek 21. století je období nástupu širokého využívání a vytváření nejrůznějších aplikací s použitím světlo-emitujících diod. LED technologie našla využití v oblastech přenosu dat, informačních kontrol, produkce velkoplošných i maloplošných projekcí, a v neméně důležité řadě, v osvětlování. Díky vývoji nových čistějších a přesnějších materiálů PN přechodů se zvýšila u světlo-emitujících diod efektivita světelného toku v poměru lumenů na watt a přišel čas nástupu bílých diod LED. Ve srovnání s dosavadními zdroji světla se liší velikostí a hlavně zmiňovanou účinností, která udává následnou spotřebu energie a ekonomický dopad na provozovatele osvětlení.

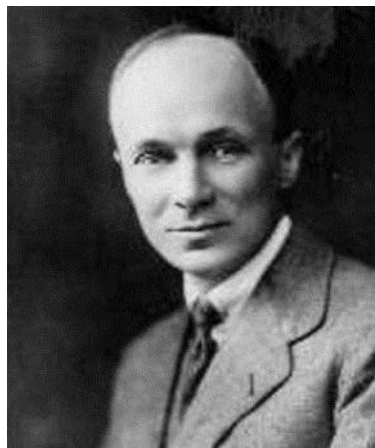
2 Historie

- 1907 - objev foto-luminiscence (první světlo-emitující dioda)
- 1962 - infračervené a červené LED
- 1972 - 1993 vznik modré a zelené světlo-emitující diody
- 1995 - bílé světlo-emitující diody

První historická zmínka o světlo-emitujících diodách, pochází z období začátku 20. století, z roku 1907.

2.1 1907 – objev foto-luminiscence (první světlo-emitující dioda)

V tomto roce uveřejnil Henry Joseph Round, velký vynálezce této doby, článek do *ElectricalWorld*, kde byl popsán objev foto-luminiscence. Zajímavostí je, že Round se v tomto výzkumu zabíral odlišnou tématikou a k tomuto objevu se tedy dostal jen náhodou.



Obr. 2.1 Henry Joseph Round (převzato z [20])

Emitované světlo vzniklo stykem krystalu karbidu křemíku (SiC) s elektrodami. Emitující diody pracovaly spíše na bázi Schottkyho diody než jako dnešní diody typu PN. Pracovní napětí se pohybovalo v rozmezí 10-110V. Polovodič karbid křemíku s vlastním zakázaným pásmem 3,26eV je velmi špatný vodič. Tato vlastnost se dala měnit vhodně zvolenými příměsemi. I přesto byl polovodič na bázi křemíku na čas zapomenut. [2,17,22]

Sovětský fyzik Oleg Vladimirovich Losev ve dvacátých letech sledoval jev elektroluminiscence na zesilovačích na bázi kov-polovodič.



Obr. 2.2 Oleg Vladimirovich Losev (převzato z [21])

Polovodiče na bázi SiC se používaly k pevné demodulaci signálu v rádiových obvodech. Nahrazovaly funkci dříve používaných elektronek. Tyto polovodiče prokazovaly vysokou tepelnou vodivost, což byla bez pochyb jejich velká výhoda a tím mohli pracovat v teplotách přesahující i 350°C. V roce 1971 byla úspěšně vyrobena na této bázi první modrá světlo-emitující dioda. Díky nedostatečné účinnosti 0,03% se od výroby tohoto druhu upustilo. Zájem se začal ubírat o III. – V. skupinu periodické tabulky prvků.

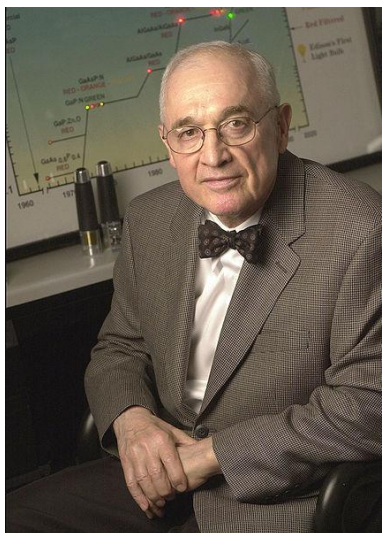
Karbid křemíku v polovodičích se v současnosti používá pro velmi rychlé Schottkyho diody, tyristory pracujících při vysokých teplotách a tranzistory typu MESFET, IGBT.[2,17,22]

2.2 1962 - infračervené a červené LED

Od poloviny 20. století se začalo pracovat s polovodičovými prvky ze skupiny III. – V. periodické tabulky prvků. A to zejména se sloučeninami GaAs (arsenid galia) a AlGaAs (hliník arsenidu galia). Výrobní proces byl již na technicky velmi dobré úrovni. Z taveniny byl vytažen monokrystal GaAs, který byl poté dělen a zabrušován až na velmi tenké plátky. Ty byly poté používány jako substrát, na němž se díky kapalnému či plynnému epitaxnímu nanášení tvořil PN přechod. Na vývoji první IR-LED (infračervené světlo-emitující diody 870 – 980nm) a laseru se podílela skupina společností.

Použití IR diod známe z domácnosti, kde se nachází v dálkových ovladačích rádií, televizí a ostatní elektroniky.[2,17,22]

Při použití dálkového ovladače jsou informace o zvoleném příkazu (př. změna kanálu) vyslána právě IR diodou směrem k zařízení, které signál přijme a vyhodnotí (provede operaci). Společnost IBM se snažila o IR záření na bázi GaAs převést do viditelného spektra zvolením správné příměsi a vytvořit tak červenou diodu. Vědci IBM pracovali se dvěma možnými sloučeninami GaAsP (Gallium arsenid fosfid) a AlGaAs. U první zmiňované sloučeniny se spojení krystalové mřížky sloučenin GaP (fosfidu galitého) a GaAs povedlo pouze ze 3,6%. Tento neuspokojivý výsledek vedl k možnosti druhé a to AlGaAs, která však také měla své problémy, neboť se hliník z důvodu rychlého podléhání oxidaci v této době považoval za nečistý. V roce 1962 IBM sestrojila experimentální zařízení na výrobu sloučeniny AlGaAs. Zařízení zamezovalo přísunu kyslíku k jednotlivým prvkům a sloučeninám a tím zamezilo oxidaci. V kapalně epitaxi byla vytvořena první dioda schopna emitovat viditelné červené světlo. Následně byl jako substrát použit GaP místo GaAs. GaP se používá dodnes. Červené diody emitující světlo ve viditelném spektru se tedy zrodili roku 1962 a to převážně díky Nick Holonyak.[2,17,22]



Obr. 2.3 Nick Holonyak (převzato z [32])

2.3 1972 – 1993 – vznik modré a zelené světlo-emitující diody

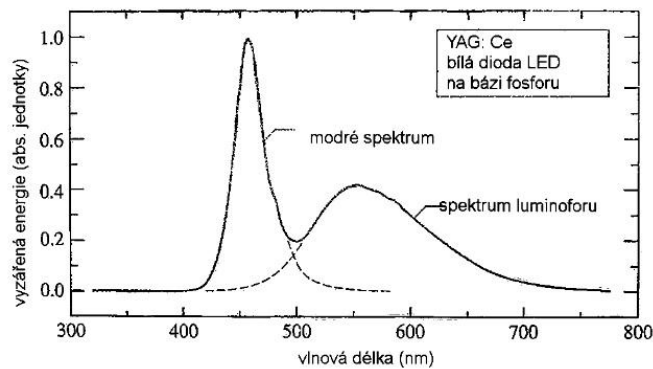
Jak už jsme si řekli, díky malé účinnosti karbidu křemíku, byl zapomenut pro výrobu světlo-emitujících modrých diod. Díky této skutečnosti za začátek považujeme rok 1991 a 1992. Ve zmíněných letech se použil k výrobě modré LED nitrid galitý (GaN) obohacen o hořčík a křemík. Tento materiál se osvědčil pro svoji vysokou rezistivitu. Na trh přichází roku 1993. Posléze začala být využívána i sloučenina GaInN, ze které se začali vyrábět také světlo-emitující diody zelené barvy. Světlo-emitující diody se sloučeninou GaInN jsou viděny dodnes například ve světelné signalizaci na dopravních komunikacích.[2,17,22]

2.4 1995 – bílé světlo-emitující diody

Bílou barvu můžeme docílit dvěma způsoby:

- Využití trichromatické soustavy
- Modrá dioda s luminoforem později ultrafialová s luminoforem

První diodu na tomto principu realizovala firma Nichia v roce 1995. Tato dioda fungovala na principu modré barvy s vrstvou fosforu (luminofor), který téměř monochromatické záření posouvá do celého spektra viz *Obr. 2.4*



Obr. 2.4 Emisní spektrum bílé světlo-emitující diody vyrobené společností Nichia Chemical Industries (Anan, Tokushima, Japonsko), převzato z [2]

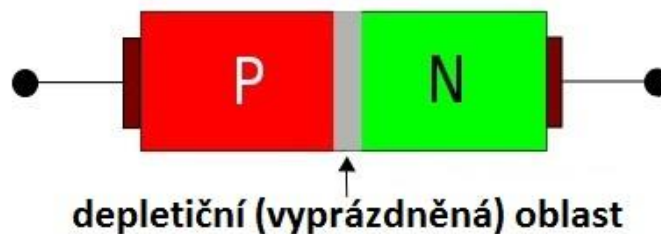
Blíže probereme v kapitole ‚Konvertor vlnových délek‘.

3 Přehled světelných diod

- Základní obecný princip elektroluminiscenční diody
- LED
 - Konvertor vlnových délek
 - Aditivní míchání barev
- Doplnující
 - OLED
 - LD

3.1 Základní obecný princip LED

V dalších pár odstavcích vysvětlíme princip světlo-emitující diody. Dioda se skládá z polovodiče typu P a typu N.



Obr. 3.1 Dioda –převzato [9]

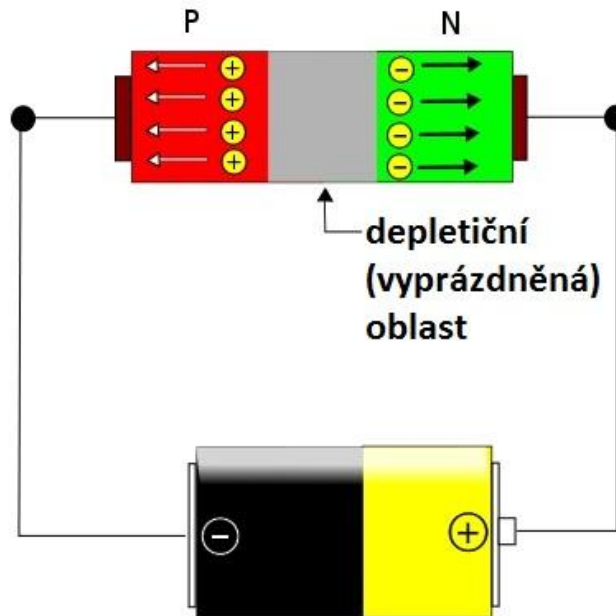
Příměsový polovodič typu N obsahuje přebytek volných elektronů, polovodič typu P přebytek kladných děr. Při spojení těchto polovodičů dojde k rekombinaci elektronu s kladnou dírou na rozhraní a zaniknou volné nosiče nábojů v oblasti určité šířky. Tato oblast se nazývá depletiční neboli vyprázdněná. Zbylé nepohyblivé ionty zapříčiní vznik elektrického pole na přechodu PN. Směr elektrického pole je takový, že brání zbylým volným nosičům nábojů pronikat přes rozhraní. Chování diody záleží na tom, jakým způsobem se zapojí.[8]

Buď to:

- v závěrném směru
- nebo v propustném směru

3.1.1 Zapojení v závěrném směru

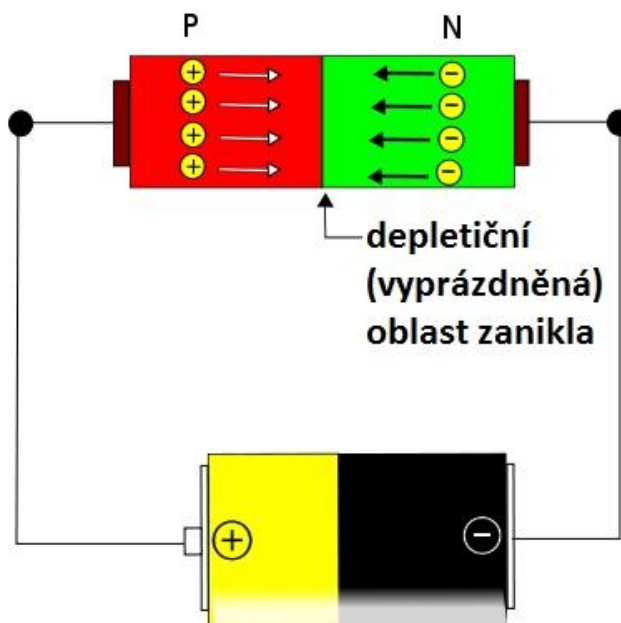
Zapojení v závěrném směru vidíme na Obr. 3.2.



Obr. 3.2 Dioda v závěrném směru - převzato [9]

Při připojení "kladného pólu" zdroje k polovodiči "typu N" a "záporného pólu" k polovodiči "typu P", se rozšíří vyprázdňené oblasti a zesílí elektrického pole na přechodu PN a dojde ke ztížení přechodu nosičů nábojů přes rozhraní. Přechod NP nepropouští elektrický proud. Malý proud, který přechodem protéká, je silně teplotně závislý. Napětí zde musí být regulováno tak, aby v určitém okamžiku nezačal protékat velký proud neb ten by mohl způsobit zničení přechodu. Došlo by k překonání vazebných sil, které působí na valenční elektrony, neboť silové účinky elektrického pole by byly větší. U tohoto typu přechodů se využívá kapacity hradlové vrstvy.[8]

3.1.2 Zapojení v propustném směru

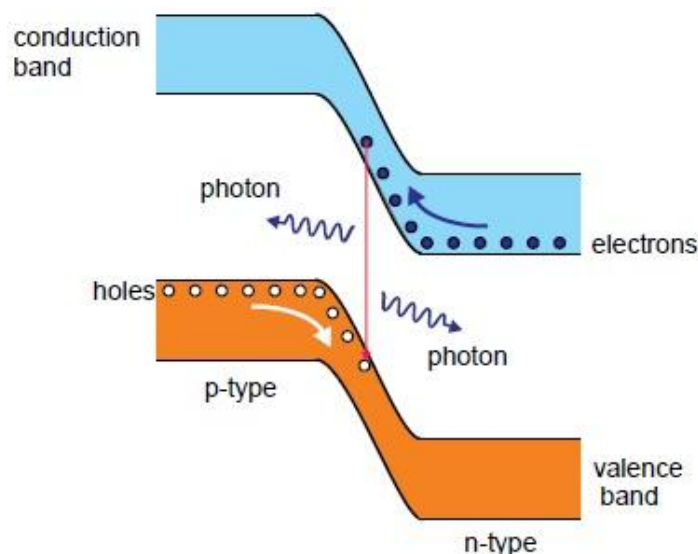


Obr. 3.3 Dioda v propustném směru - převzato [9]

Zapojení v propustném směru vidíme na *Obr. 3.3*. Na polovodič typu N je přiveden záporný pól baterie (stejnoseměrného zdroje) a na polovodič typu P kladný a tím je zajištěn průchod proudu obvodem, který působí proti poli depletiční oblasti. Materiál typu N se vyznačuje nadbytkem volných elektronů (nosiče elektrického náboje). Opačná situace platí pro materiál typu P, kde hovoříme o tzv. dírách. Na rozhraní těchto dvou materiálů dojde k rekombinaci volných nosičů náboje (elektronů a děr) a nepohyblivé ionty způsobí vznik elektrického pole, které brání průchodu zbylých volných nosičů. Tedy dojde k vytvoření energetické bariéry, kterou budeme nazývat oblastí prostorového náboje.

Nyní přecházíme k prvnímu zásadnímu rozdílu mezi klasickými usměrňujícími diodami a LED. U klasických diod je naší snahou, aby po přiložení vnějšího elektrického pole oblastí prostorového náboje prošlo maximum volných nosičů a nedocházelo, tak ke ztrátám v oblasti prostorového náboje, což by kromě snižování účinnosti diody způsobovalo také její ohřívání a v důsledku možné zničení. U LED se naopak snažíme, aby maximum těchto nosičů vzájemně rekombinovalo v této oblasti za vzniku viditelného záření v podobě světla. Zmiňovaný rekombinační proces, který stojí za vznikem viditelného záření v podobě fotonu, si nyní zběžně popíšeme.[1,2,8,9,10]

Vlivem proudu protékající diodou dochází ke vzniku fotonu vlivem rekombinací elektronů a děr viz Obr. 3.4



Obr. 3.4 Ukázka vytvoření fotonu v NP přechodu (převzato z[1])

Rekombinací každého páru elektron-díra dojde k uvolnění určité kvantum energie, která se vyzáří mimo krystal. Dochází k přeměně elektrické energie na světlo určité barvy. U LED diod se jedná o nekoherentní světlo na rozdíl od laserových diod. Tam nastává stimulovaná emise optického záření a využívá se k zesilování světla. Luminiscence je vlastnost některých látek, kdy díky vybuzení nosičem náboje předávají svoji energii ve formě fotonů. Světlo-emitující dioda pracuje na principu elektroluminiscence. Elektroluminiscence v polovodičích se dosahuje nejčastěji injekcí nosičů náboje na PN přechodu viz Obr. 3.4. [1,2,8,9,10]

Energie fotonů emitovaných z polovodiče je rovna rozdílu energií vodivostního a valenčního pásu[22]

$$E_g \approx |E_c - E_v| \approx hv \quad (3.1)$$

kde h je Planckova konstanta, v je frekvence. Tato energie je též nazývána zakázaný pás (angl. band gap, pozn. autora) a v mnoha publikacích se setkáme i se značením W_g . Vztah je odvozen Albertem Einsteinem. V ideální diodě by tento vztah znamenal, že každý elektron injektovaný do aktivní oblasti generuje foton. Zákon o zachování energie proto vyžaduje, aby energie, s kterou byl elektron injektován, byla rovna energii fotonu. Tento stav je popsán rovnicí [22]

$$eU = hv \quad (3.2)$$

kde součin eU je energie pole (e značí elektrický náboj, U značí přiložené napětí, resp. rozdíl potenciálů). Existuje zde několik příčin, které mohou změnit tento ideální stav.[22]

Distribuce volných nosičů náboje v PN přechodech z homogenního materiálu závisí na difuzní konstantě samotných nosičů. Tuto konstantu je složité změřit. Častější se měří hybnost volných nosičů. Difuzní konstanta lze odvodit z hybnosti nosičů Einsteinovým vztahem[22]

$$D_n = \frac{kT}{e} \mu_n D_p = \frac{kT}{e} \mu_p \quad (3.3)$$

kde D_n a D_p jsou difuzní konstanty elektronů a děr, k je Boltzmannova konstanta, T je termodynamická teplota, μ_n a μ_p jsou hybnosti elektronů a děr. Střední vzdálenost minoritního nosiče difundovaného před rekombinací je nazvána difuzní délkou. Elektrony injektované do oblasti typu p budou difundovat s difuzní délkou L_n dokud nedojde k rekombinaci s dírami. Difuzní délka je popsána vzorcem:[22]

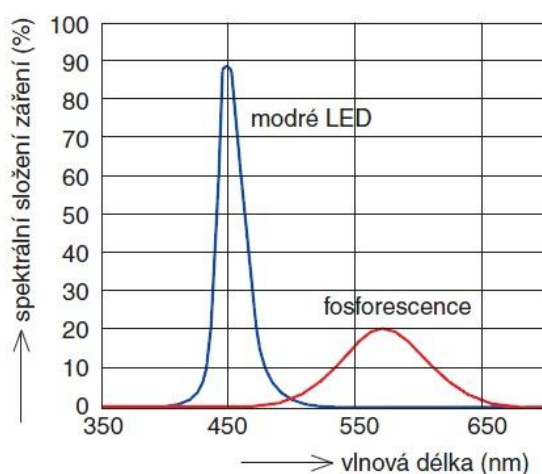
$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (3.4)$$

τ značí dobu života elektronů a děr. V typických polovodičích jsou difuzní délky v jednotkách až desítkách mikrometrů. Například difuzní délka elektronů v polovodiči typu P u arzenidu galitého (GaAs) je přibližně $15\mu\text{m}$. [22]

3.2 Konvertor vlnových délek

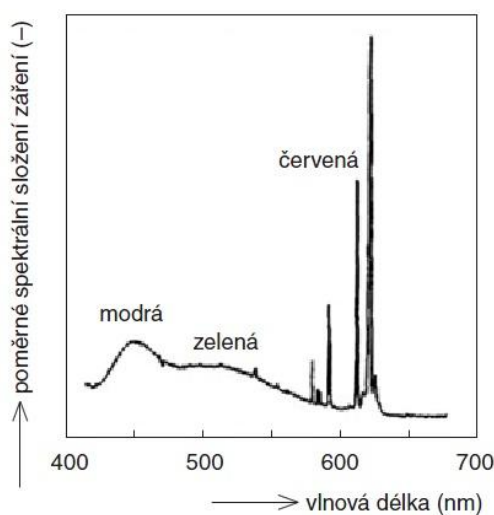
Jak jsme si řekli z principu funkce světelných diod nelze jinak získat bílé světlo nežli využitím konvertoru vlnových délek nebo trichromatickým skládáním červené, zelené a modré barvy. Konvertoru neboli využití fosforescence luminoforů.

Vhodným luminoforem je ytрито-hlinitý granát aktivovaný cerem (Y₃Al₅O₁₂:Ce), který je buzen světlem modré diody InGaN (výsledné spektrum je na Obr. 3.5), anebo třípásmový luminofor buzený zářením ultrafialové diody Obr. 3.6.[11]



Obr. 3.5 Emisní spektrum bílé LED - luminofor buzený světlem modré diody (převzato z [11])

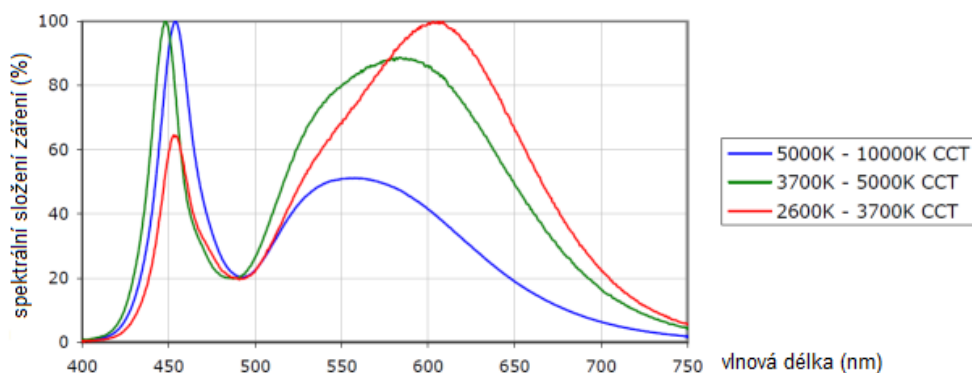
Tento způsob je obdobný principu vzniku světla v klasických zářivkách. Spektrum na Obr. 3.5



Obr. 3.6 Emisní spektrum bílé LED - třípásmový luminofor buzený zářením UV diody (převzato z [11])

ve viditelné oblasti obsahuje přímé světlo modré LED i spojitě spektrum použitého luminoforu. Tato varianta je energeticky úspornější a v porovnání s LED se třemi čipy i [11]

rozměrově menší, avšak ve výsledném modro-žlutém spektru je potlačena zelená a červená složka, což se projevuje horším podáním barev osvětlovaných předmětů. U diod s třípásmovým luminoforem se UV záření vlastní diody ve spektru neprojevuje a výsledný index podání barev R_a dosahuje hodnot nad 80. Bílé LED se vyrábějí ve velmi širokém rozsahu náhradní teploty chromatičnosti – od 2 500 do 4 000 K u teplých odstínů a 5 000 až 8 000 K u chladnějších odstínů. Výrobci nabízejí LED odstupňované po 1 000 K.[11]



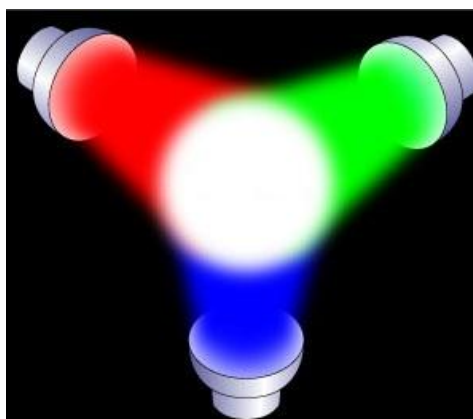
Obr. 3.7 Emisní spektrum bílých světelných diod s různou teplotou chromatičnosti (převzato z [19])

3.3 Aditivní míchání barev

Neboli míšení, sčítání jednotlivých monochromatických barev. Můžeme vytvořit bílou barvu pomocí dvou (dichromatický zdroj) nebo tří (trichromatický zdroj) a více barev. Zvolením více barev zvyšujeme kvalitu barevného podání barev R_a .

Vysvětlíme si pojem LED-RGB. Vytvořený světelný zdroj pomocí LED-RGB se skládá ze tří diod červené, zelené a modré, nebo ze tří čipů na jednom podkladu zmiňovaných barev. Na

Obr. 3.8 vidíte dokonale smíchané tyto tři základní barvy, které vnímá naše oko.



Obr. 3.8 Dokonale smíchané barvy červené, zelené a modré (převzato z [18])

Poměrem těchto barev lze vytvořit jakákoliv barva viz kapitola kolorimetrie. Takto vytvořený zdroj bílého světla je velmi náročný na řízení. Řízení se skládá z programově říditelného

zdroje proudu. Tímto zdrojem nastavíme poměry jednotlivých barev podle Tabulka 1, tak abychom replikovali požadovanou barvu.

R	G	B	barva
0	0	0	černá
255	0	0	červená
0	255	0	zelená
0	0	255	modrá
255	255	0	žlutá
255	0	255	purpurová
0	255	255	azurová
255	255	255	bílá

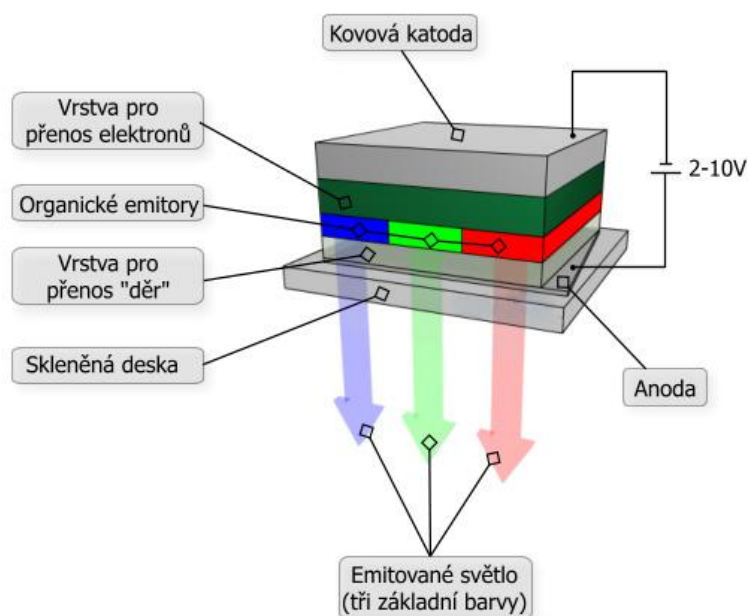
Tabulka 1 Adaptivní míchání barev (převzato z [13])

U použití míchání RGB nastávají problémy s nežádoucí nerovnoměrnou degradací jednotlivých barev a tím i výší poměru ceny k životnosti vůči konvertoru vlnových délek s použitím luminoforů.

3.4 Doplňující

3.4.1 OLED – Organic Light Emitting Diode

Hlavní princip OLED technologie je nastíněn již její zkratkou a ta v plném znění zní Organic Light Emitting Diode. Displeje založené na této technologii fungují podobně jako běžné LCD. Jednotlivé pixely obrazu jsou také složeny ze tří základních barev – subpixelů (červeného, zeleného a modrého), které tu tvoří malé diody z organických materiálů.



Obr. 3.9 Princip OLED (převzato z [24])

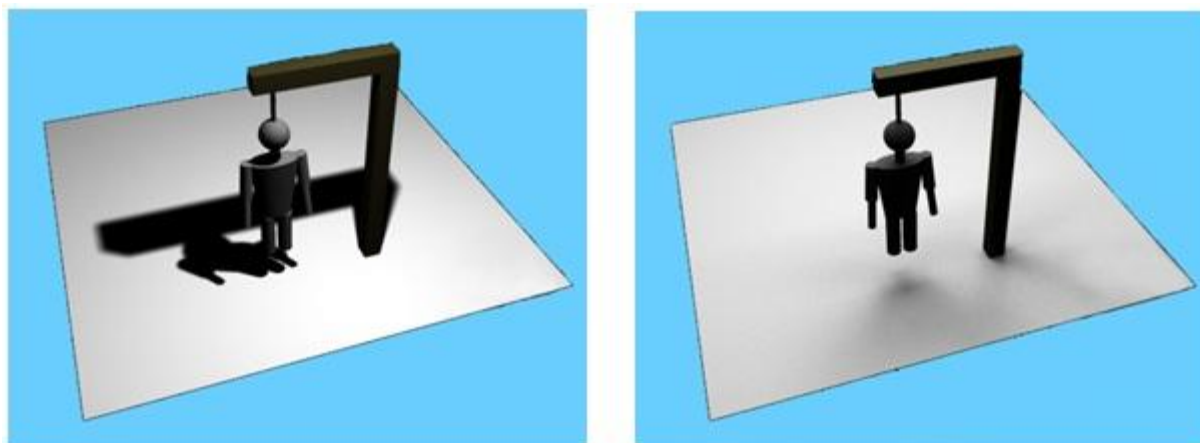
Základním prvkem je již zmiňovaný organický materiál, který emituje světlo určité barvy, pokud je na něj přivedeno stejnosměrné napětí. Aby se pixel rozsvítil, stačí přivést napětí v rozmezí 2-10V. Samotné organické emitory jsou napájeny z kovové katody přes vodivou vrstvu, která je zde ještě k tomu, aby bylo zajištěno, že se napětí dostane ke správnému emitoru. Na druhé straně je anoda, ve které se vytvářejí elektronové díry, jež jsou přenášeny přes organickou vrstvu až do jednotlivých subpixelů. Elektrony tedy proudí z katody do vodivé vrstvy a až poté do samotného organického materiálu, který tímto emituje fotony o specifické vlnové délce a tedy svítí.[24]

U OLED technologií je podobně jako u LCD použito aktivní či pasivní řízení sítě buněk. Použitím aktivní matice – AMOLED (Active Matrix Organic Light Emitting Diode) dosáhneme zřetelně vyšší rozlišení a jasů. Hlavní výhodou pasivní matice – PMOLED (Passive Matrix Organic Light Emitting Diode) je tedy v zásadě jen její menší pořizovací

cena, používá se spíše jen pro jednodušší zobrazování. Kromě těchto dvou základních typů existují i jejich další vylepšené varianty:

- FOLED (Flexible OLED), kde je OLED struktura umístěna místo na skle na pružném materiálu. Displej poté můžeme umístit i na místa, kde by to normálně nebylo možné (např. hledí přilby) a navíc je mechanicky odolnější.
- TOLED (Transparent OLED) – touto technologií lze vytvořit téměř průhledný displej.
- PHOLED (Phosphorescent OLED), která dosáhne až čtyřikrát vyšší účinnosti oproti klasickému OLED. *Využívá principu elektrické fosforescence, která převádí až 100 % elektrické energie na světlo. To je v porovnání s účinností 25-30 % u „klasických“ OLED a jen cca 10 % u LCD obrazovek, velký pokrok. Při jasu 200 cd/m² dosahuje spotřeby pouze 125 mW, tedy výrazně méně než pod světlené LCD (240 mW). Nejnovější PHOLED jsou při napětí 6,5 V schopny dosáhnout osvětlení 18 lm/W a jas 1000 cd/m². Tedy výrazně větší jas než nejnovější LCD s 600 cd/m². [25]*

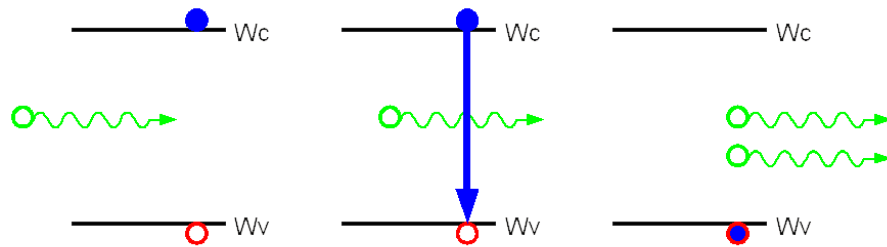
V současnosti se OLED technologie používají ve větší míře pouze ve vizuální technice (obrazovky atd.), avšak její potenciál by se do budoucna mohl ubírat také k osvětlování vnitřních prostorů. Velikou výhodou tohoto osvětlení by byla zejména jeho rovnoměrnost, protože díky nízkým výrobním nákladům by bylo možné mít OLED technologií pokrytou celou plochu stropu. Poté by nedocházelo k vrhání stínů, čemuž se při použití klasického bodového zdroje nevyhneme. Rozdíl mezi bodovým (vlevo) a celoplošným (vpravo) osvětlením znázorňují obrázky níže. Osvětlení na bázi OLED by navíc mělo minimální spotřebu.



Obr. 3.10 Rozdíl mezi bodovým (vlevo) a celoplošným (vpravo) osvětlením (převzato z [24])

3.4.2 Laserové diody

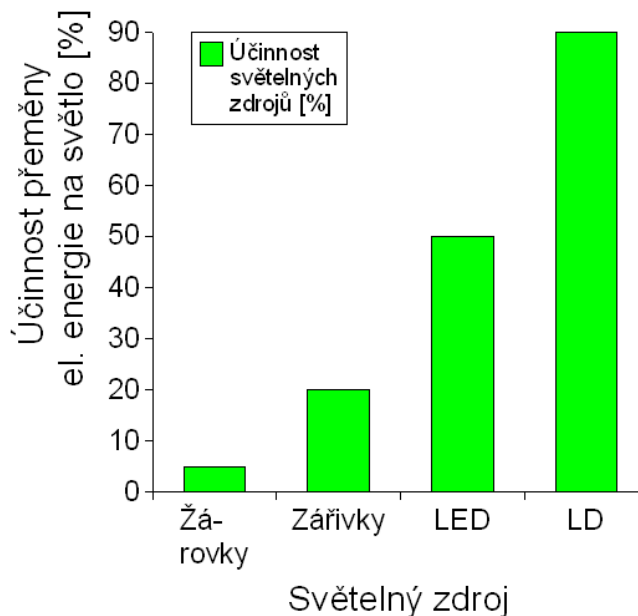
Laser (z angl. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) je kvalitativně novým typem světelného zdroje, svým principem v zásadě odlišným od „klasických“ zdrojů. Kvantový systém, nacházející se ve vybuzeném elektronovém energetickém stavu, může přejít do některého stavu s nižší energií za současného vyslání kvanta elektromagnetického záření – fotonu. Tento přechod může proběhnout dvojím způsobem: spontánní emisí nebo stimulovanou emisí. Pro funkci laseru je důležitá druhá možnost.[4]



Obr. 4 Stimulovaná emise (převzato z [23])

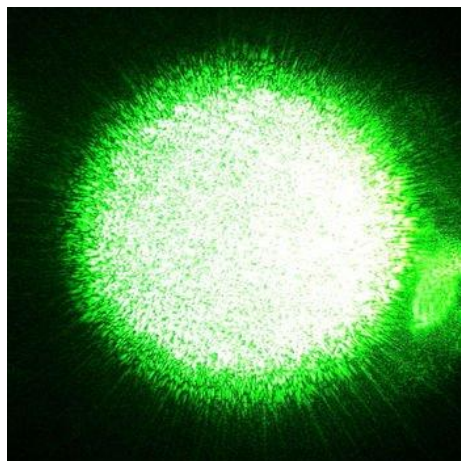
Předpokladem stimulované emise je, že na systém již působí elektromagnetické záření stejné frekvence, jako má vyzařovaný foton. Pravděpodobnost stimulovaného přechodu je přímo úměrná hustotě energie tohoto záření a vyzářený foton je s tímto zářením koherentní. Tohoto jevu, při němž se energie předává z kvantového systému do elektromagnetického pole, lze využít ke generování a zesilování koherentního záření.[4]

Z pohledu osvětlování je zajímavá jeho dosahující efektivita vůči ostatním světelným zdrojům viz Obr. 3.11.



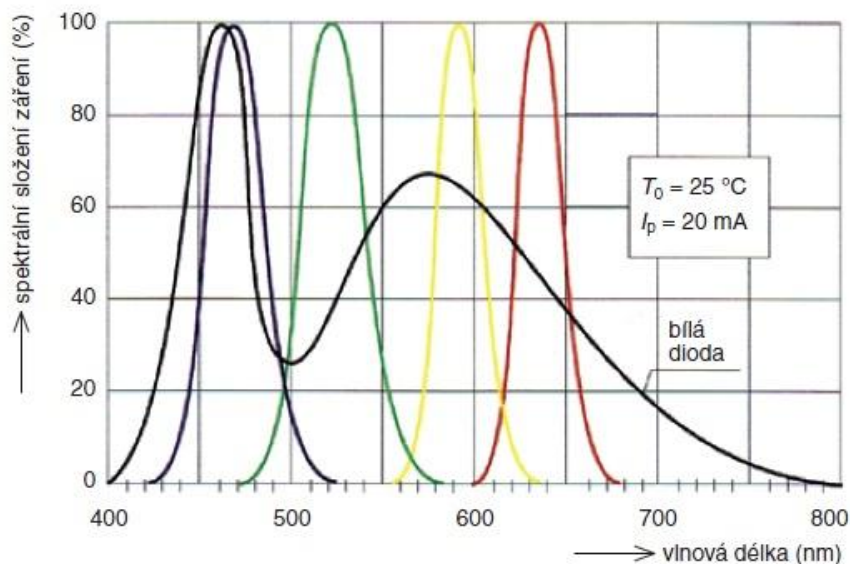
Obr. 3.11 Srovnání efektivit LED se základními světelnými zdroji (převzato z [23])

Laserové diody, navzdory jejich vysoké účinnosti a výkonu, se k osvětlování bohužel nehodí. Důvodem je zejména jimi vykazovaný rušivý efekt zrnění. Ten je ukázán na Obr. 3.12.



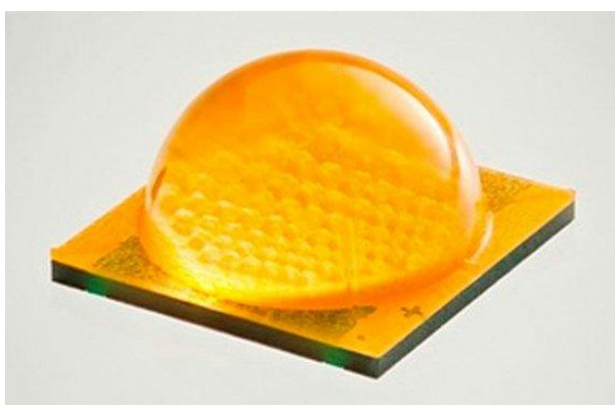
Obr. 3.12 Ukázka zrnění LD (převzato z [23])

Zrnění vytvořené vzájemnou interferencí koherentních vlnoploch, které jsou mezi sebou fázově posunuty a probíhají mezi nimi fluktuace intenzity. Díky tomuto zrnění není tento zdroj zatím vhodný k použití v osvětlovací technice.



Obr. 4.2 Emisní spektrum vybraných barevných LED (převzato z [11])

Teoretické možnosti zvyšování tohoto výkonu jsou přibližně charakterizovány hodnotami 60 lm/W u modrých diod, asi 290 lm/W u červených, více než 500 lm/W u žlutých, téměř 590 lm/W u zelených diod a více než 270 lm/W u bílých diod



Obr. 4.3 LED firmy Cree 254lm/W (převzato z [26])

(Rekord je z dubna 2012 kdy společnost Cree naměřila v laboratorních podmínkách měrný světelný výkon 254lm/W při pokojové teplotě u LED diody viz Obr. 4.3 s použitím technologie SC3, teplota chromatičnosti 4 408 K, pracovní proud 350 mA.).

Elektroluminiscenční diody právě těmito hodnotami jasně dokazují, že si zaslouží své důležité místo mezi světelnými zdroji.[26]

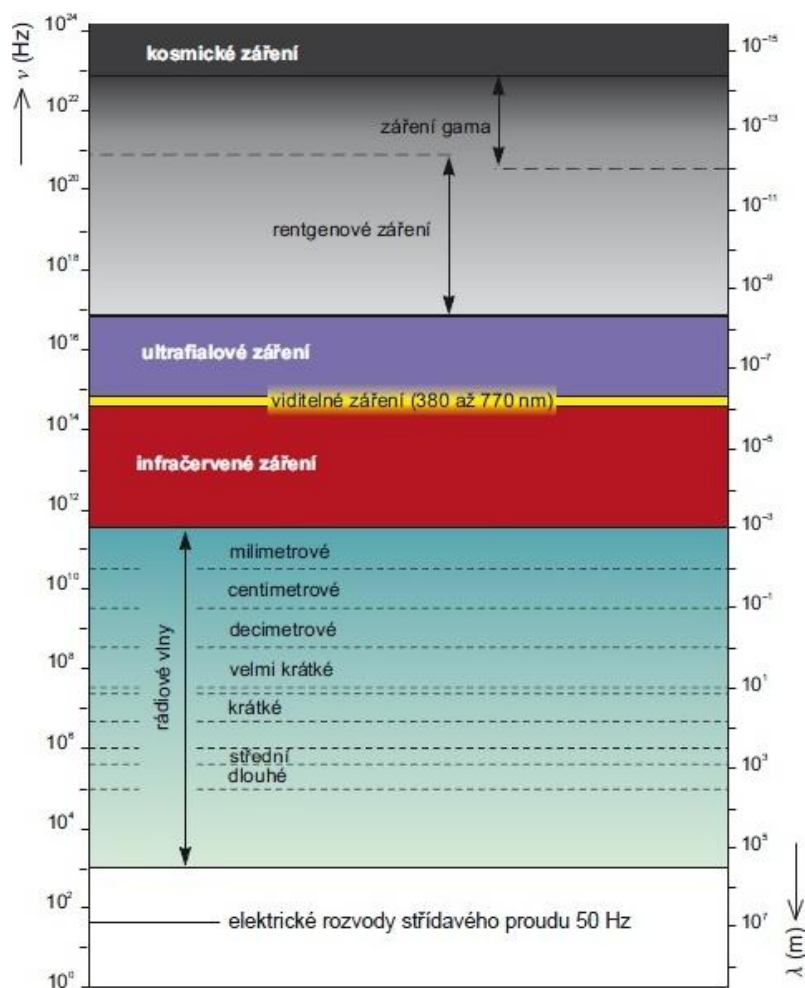
4.2 Optické vlastnosti

4.2.1 Záření

Zářením, jiným slovem radiací, nazýváme přenos energie prostorem ve formě hmotných částic či elektromagnetických vln. *Kvantová teorie připisuje elektromagnetickému záření kvantovou korpuskulární strukturu a naopak částicím vlnový charakter. V moderní fyzice se tedy vychází z duálního charakteru záření a neklade se jednoznačná hranice mezi vlnovým charakterem elektromagnetického záření a korpuskulárním zářením, jehož energii přenášejí částice.*[14]

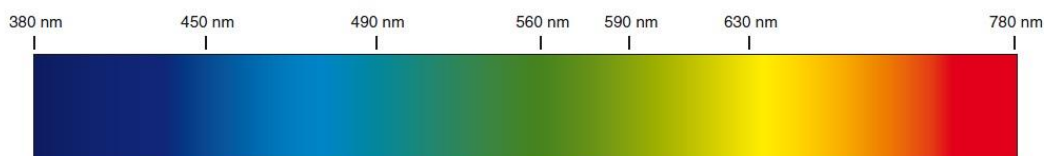
Jakékoliv záření lze rozložit na jednotlivé složky, které jsou definovány vlnovou délkou λ a kmitočtem (udáván v Hz) a mají všechny sinusový průběh. Seřazením těchto složek vzestupně podle jejich vlnových délek či kmitočtů vznikne spektrum záření.

Toto je znázorněné na *Obr. 4.4*.



Obr. 4.4 Spektrum elektromagnetických záření s orientačním (převzato z [14])

Elektromagnetické záření s vlnovými délkami ležícími mezi oblastí přechodu k rentgenovému záření (asi 1 nm) a oblastí přechodu k rozhlasovým a televizním vlnám (přibližně 1 mm) se nazývá optické záření.[14] Každé optické záření, které lidské oko dokáže vnímat tak, aby ho mozek dokázal doopravdy zpracovat, nazýváme viditelné záření. Dolní hranice vlnových délek pro viditelné záření se udává mezi 360 a 400 nm a horní mez 760 až 830 nm.



Obr. 4.5 Rozložení barevných tónů ve spektrální oblasti viditelného záření (převzato z [14])

Záření s kratšími vlnovými délkami než je dolní hranice viditelného záření nazýváme ultrafialové (UV), po překročení jeho spodní hodnoty vlnové délky je dále rentgenové záření a záření gama. Naopak v případě delších vlnových délek než je horní hranice viditelného záření mluvíme o záření infračerveném (IR) a posléze o rádiových vlnách.

Předmětem nauky o barvě je objektivní hodnocení barvy světla různých zdrojů i barvy pozorovaných předmětů. Jde o náročný úkol, neboť vnímání barev je složitý fyziologicko-psychický proces.[15]

4.2.2 Vjem barvy

Vnímání barev není ve všech případech totožné a to ze dvou důvodů. Zaprvé je to děj postavený na fyziologických vlastnostech lidského oka a tyto vlastnosti se mohou u jednotlivých jedinců mírně lišit. Zadruhé je barevné vnímání také ovlivněno momentálními okolními podmínkami, za jistých podmínek je možné, že naše oko bude vnímat dvě různé barvy totožně. Tento jev je označen jako metametrie (vysvětlení níže).

Pojmy používané při popisech barev a barevných vlastností světelných zdrojů a předmětů:

- Chromatičnost = barevné vlastnosti světla, které jsou určeny spektrálním složením vyzařujícího zdroje
- Kolorrita = barevné vlastnosti látek, je dána spektrálním složením zdroje, jenž je použit k osvětlení předmětu, a spektrální odrazností nebo propustností materiálu.

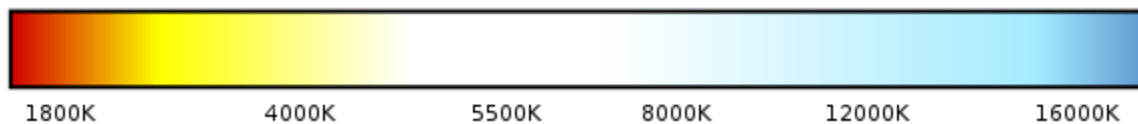
- Metametrie = děj, kdy naše oko vnímá dvě různé barvy stejně. Metametrie může být způsobena druhem použitého osvětlení či různou barevnou citlivostí lidského oka. Uvnitř očí se nalézají čípky citlivé na dlouhé, střední a krátké vlnové délky, určitou jejich stimulací může dojít k momentu, kdy se barvy jeví oku totožně.
- Barevný tón = kvalitativní odlišnost vjemu jednotlivých spektrálních barev[4], každý barevný tón je charakterizován určitou vlnovou délkou. Každý barevný tón je označován názvem příslušné barvy.

Rozmezí vlnových délek (nm)	Barevný tón
380 až 430	fialová
430 až 465	modrofialová
465 až 490	modrá
490 až 500	modrozelená
500 až 560	zelená
560 až 575	zelenožlutá
575 až 585	žlutá
585 až 620	oranžová
620 až 770	červená

Tabulka 2 Vlnové délky spektrálních barev

- Chromatické a achromatické barvy = můžeme je též označit za pestré a nepestře. Chromatickými barvami jsou ty, mající barevný tón (tzn. modrá, červená atd.), mezi achromatické tedy patří bílá, černá a odstíny šedivé.
- Spektrální a nespektrální barvy – jako spektrální označujeme ty barvy, které lze nalézt ve spektru slunečního záření (vidíme je například v duze), naopak nespektrální nenajdeme ve slunečním záření ani v záření žádného umělého zdroje. Vznikají mícháním krajních barev viditelného spektra. Tyto barvy nazýváme purpurovými.
- Barevná sytost – zcela sytými barvami jsou barvy spektrální, jejich sytost je rovna jedné. Mícháním těchto barev s bílou či černou sytost klesá, neboť nepestře barvy mají sytost rovnou nule.

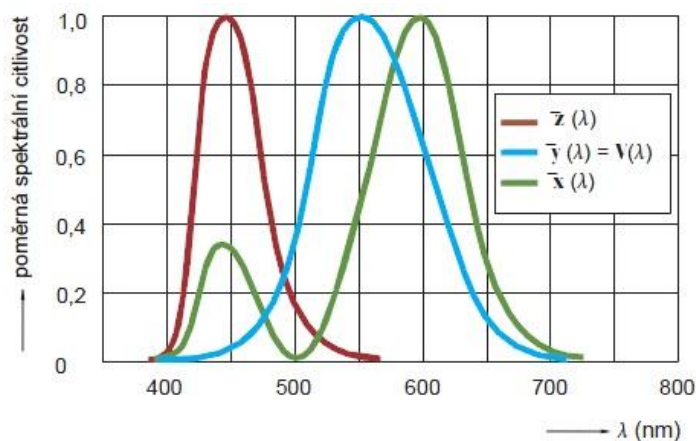
- Teplota chromatičnosti Obr. 4.6 (barevná teplota) – je dána absolutně černým tělesem, které když zahřejeme na danou teplotu, tak vydává záření právě v dané barvě. Udává se v Kelvinech (K)[16]. Podle teploty chromatičnosti dělíme barvy na teplé a studené.



Obr. 4.6 Teplota chromatičnosti (převzato z [16])

- Barevný podnět = záření charakterizované určitým spektrálním složením a světelným tokem či jasem, který vniká do oka pozorovatele a budí barevný počitek.[15]

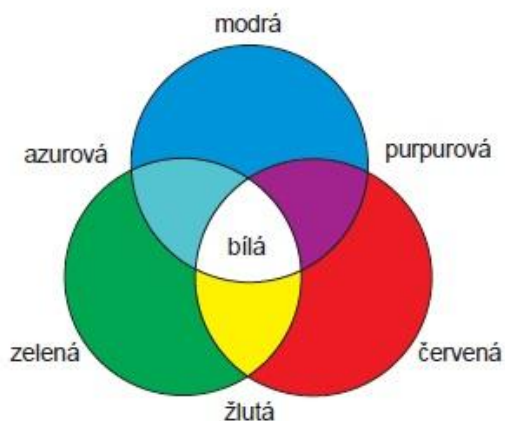
Na obrázku níže je znázorněn průběh závislosti spektrální hustoty zářivého toku $\varphi_{e\lambda}$ na vlnové délce λ .



Obr. 4.7 Spektrální průběhy kolorimetrických koeficientů trichromatické (převzato z [15])

Lidské oko vnímá složení světla aditivně (již smíchané), neumí rozpoznat jeho spektrální skladbu. To znamená, že monochromatickému záření odpovídá vždy přesně daná vlnová délka.[16]

Kteroukoliv barvu lze vyjádřit jako kombinaci tří základních barev (trichromatická soustava RGB). Způsob míšení je znázorněn na Obr. 4.8.



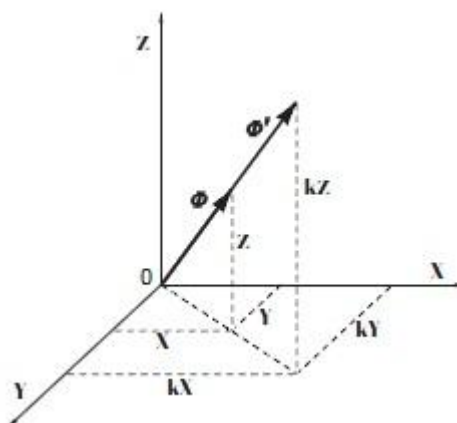
Obr. 4.8 Znárodnění principu míšení tří základních (převzato z [15])

Za bílé světlo (střed obrázku) je označeno například sluneční záření. Můžeme ho získat rovnoměrným smícháním všech tří barev. Po odebrání oblasti spadající pod modré světlo, získáme záření žluté barvy. Odfiltrováním zelené oblasti dostaneme barvu purpurovou a zbavíme-li se záření červeného, uvidíme barvu modrozelenou.

Bílou barvu můžeme mimo míchání tří základních barev získat i vhodným smíšením dvou doplňkových barev (výše zmíněné žluté, purpurové a modrozelené).[4,16]

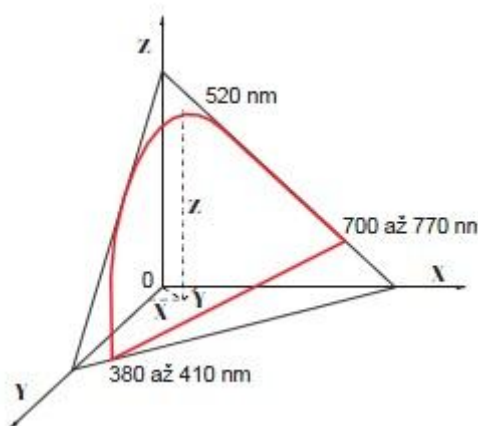
4.2.3 Trichromatické soustavy

Pro objektivní popis barev byla Mezinárodní komisí pro osvětlování CIE vytvořena trichromatická soustava. Její název byl dán již výše zmíněným faktem, že jakákoliv barva lze vytvořit určitým smícháním tří barev základních. *Soustavu definují tři barevné činitele, kteří se označují malými písmeny $x^-(\lambda)$, $y^-(\lambda)$, $z^-(\lambda)$. Velkými písmeny X , Y , Z pak značíme trichromatické složky. Ty udávají kolorimetrické množství všech tří barev, které vyvolají požadovaný barevný vjem[16].* Ten je charakterizován barevným tónem, sytostí barvy a intenzitou, je možné je znázornit (označené například jako X , Y , Z) v trojrozměrné soustavě souřadnic. Viz Obr. 4.9.



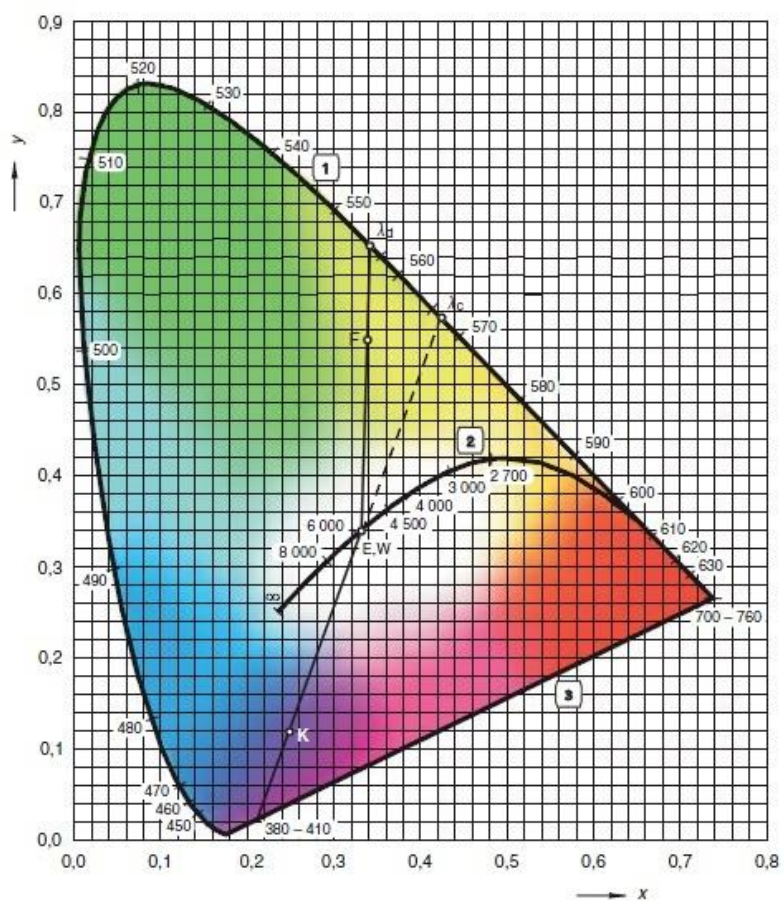
Obr. 4.9 Prostorové znázornění barevných podnětů v prostorové soustavě souřadnic (převzato z [16])

Intenzity jednotlivých barevných tónů jsou znázorněny přímkami protínajícími počátek 0. Součet intenzit všech tří složek udává intenzitu barevného podnětu, ten se tedy rovná $X + Y + Z$. Vytněme-li v trojrozměrné soustavě souřadnic oblast tak, abychom na jednotlivých osách vytyčili stejně dlouhé úsečky (což je například plocha $X + Y + Z = 1$), získáme ve vzniklém prostoru kolorimetrický trojúhelník barev. (viz Obr. 4.10) Červeně zvýrazněná křivka zastupuje čisté spektrální barvy.[16]



Obr. 4.10 Náčrt trojúhelníku barev v prostorové soustavě souřadnic (převzato z [16])

Neuvažovali bychom intenzitu, ale jen barevný tón a sytost. Danou situaci lze znázornit i ve dvourozměrné soustavě souřadnic. (viz Obr. 4.11) Čím více se blížíme středu vzniklého obrazce, tím nám klesá sytost barev, až získáme barvu bílou.[16]



Obr. 4.11 Kolorimetrický trojúhelník (převzato z [16])

4.2.4 Index podání barev (Ra)

Index podání barev Ra, anglickým názvem color rendering index (CRI), porovná barevný vjem vzniklý na světle z nějakého zdroje a tím jaký by tento vjem byl při působení slunečního záření. Hodnoty Ra rovny stu značí, že použití tohoto zdroje nám zaručí přirozené vnímání barev. Naopak nulovou hodnotou Ra rozumíme takové osvětlení, při kterém barvy nelze rozeznat. *Evropská norma EN 12424-1 určuje minimální hodnotu při osvětlení v kancelářích Ra = 80.[..]* Různé druhy LED osvětlení lze sehnat s indexem podání barev pohybujícím se od 65 až do 90 (někdy je možno i více). Samozřejmě jsou nejlepší co nejvyšší hodnoty Ra, avšak index podání barev je nepřímo úměrný výkonnosti LED diod. Zatím jsou známé tři způsoby, jak dosáhnout zvýšení Ra při nezměněném (či alespoň minimálně zmenšeném) výkonu diod. První metodou je využití optického materiálu cestou odrazu nebo prostupu. Druhou možností je míchání teplých a studených barev. A poslední možností je přidávání různých barev (zelená, oranžová, červená) ke studené bílé barvě. Každou z těchto možností lze docílit požadované výše Ra při co nejmenších ztrátách.[1,16,22]

4.3 Ostatní doplňující informace o LED

- dlouhá životnost (teoreticky 100 000 h)
- barvy – není třeba používat filtry pro různé barvy
- klesají pořizovací náklady
- závislost měrného výkonu na teplotě okolí
- světlo vyzařují v úzkém paprsku – nutnost optiky (např. Fresnelovy čočky, difuzní materiály apod.)
- nízké provozní napětí – bezpečnost
- okamžitý start a restart – možnost blikání, stmívání
- vyzařované spektrum neobsahuje podíl IR ani UV záření
- světelný tok klesá se vzrůstající teplotou
- rychlá emise světla (řádově v jednotkách ms)
- předřadné proudové zdroje, na kterých závisí účinnost celého systému a životnost
- světlo z bílých LED může mít špatný index podání barev.
- problémy s oslněním

5 Vlastní modely

- Konstrukce
- Měření
 - Spektrometr: „Red Tide USB650 UV“
 - Měřicí komponent
 - S použitím LED-RGB
 - S použitím polopropustných zrcadel
 - S použitím osmi vlnových délek

5.1 Konstrukce prototypů

5.1.1 S použitím LED-RGB

Pro tento prototyp jsme použili 3W LED-RGB, viz *Obr. 5.1*



Obr. 5.1 Fotka LED-RGB (převzato z [27])

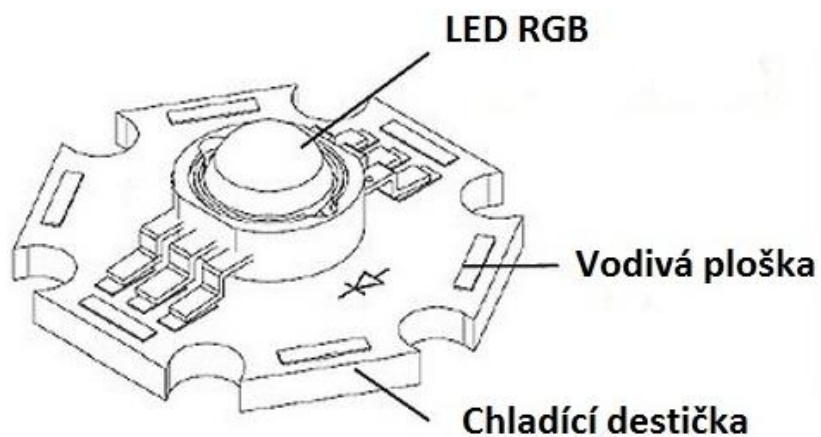
Celkové vlastnosti tří wattové LED-RGB určují parametry jednotlivých čipů barev.

Ty jsou uvedeny v *Tabulce 3*.

ČERVENÁ 625nm	ZELENÁ 525nm	MODRÁ 470nm
Uf: 2.0-2.4V	Uf: 3.2-3.6V	Uf: 3.2-3.6V
If: 400mA	If: 350mA	If: 350mA
If: 45-55lm	If: 50-70lm	If: 15-25lm

Tabulka 3 Parametry LED-RGB (převzato z [27])

LED-RGB je přilepena na základní chladicí hliníkovou destičku, na jejíž okrajích jsou vyvedeny vodivé plošky jednotlivých barev. Celé rozložení můžete vidět na *Obr. 5.2*

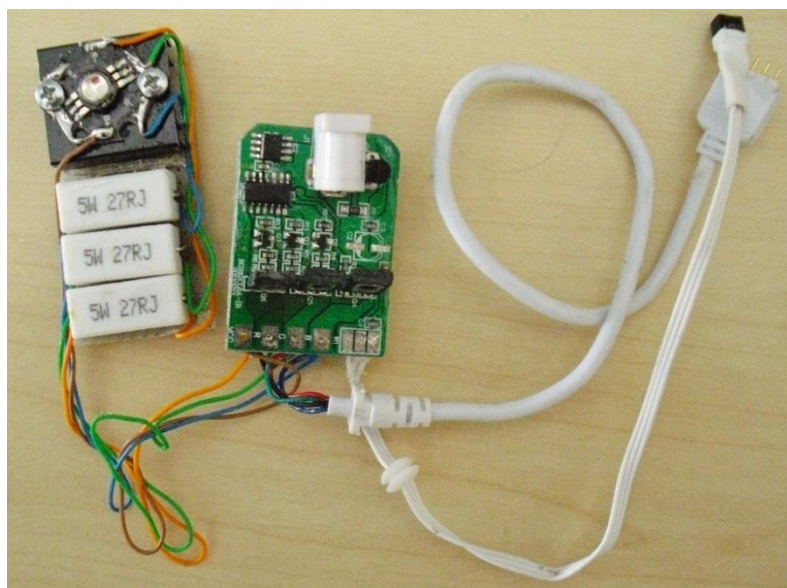


Obr. 5.2 Rozložení výstupů na chladicí plošce (převzato z [29])

K řízení jsme použili řídicí jednotku a zdroj od RGB pásků volně prodejných.



Obr. 5.3 Fotka řízení RGB pásku s ovladačem



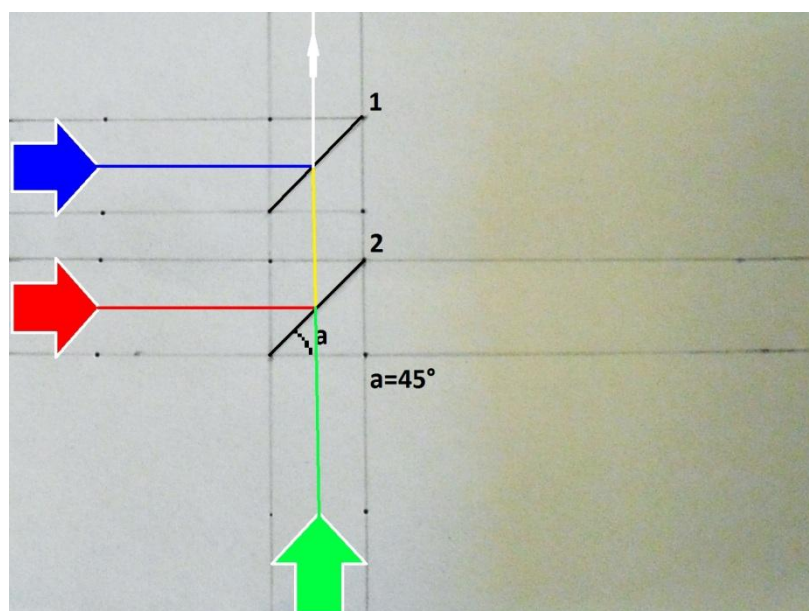
Obr. 5.4 Aplikace řízení na LED-RGB

5.1.2 S použitím polopropustných zrcadel

Skládání pomocí Dichroických filtrů pracuje na funkci odrazu určitých vlnových délek, v ideálním případě pod úhlem 45° .

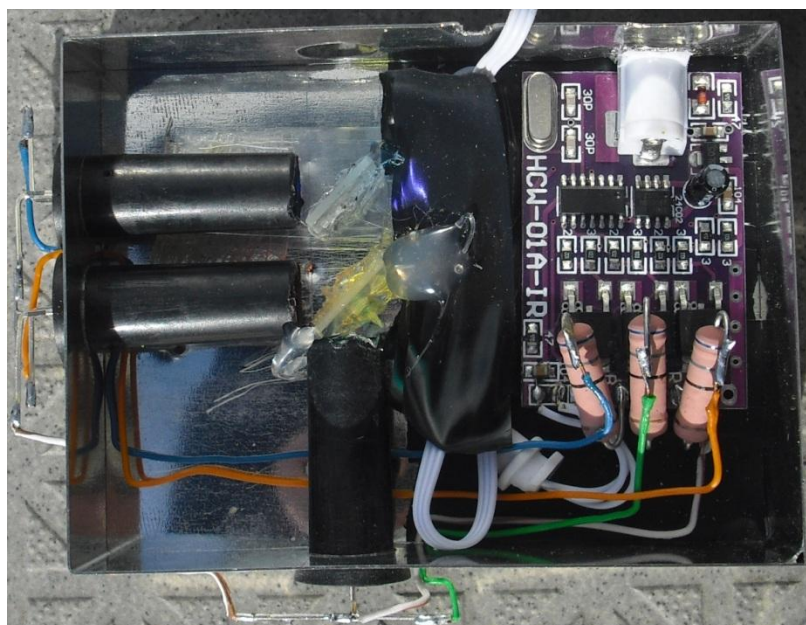
1. Filtr propouští žlutou a odráží modrou barvu
2. Propouští zelenou a odráží červenou barvu

Tento princip při dodržení velké přesnosti rozvržení zdrojů, filtrů a všech potřebných optických komponentů by měl být při skládání barev ideální.



Obr. 5.5 Návrh rozložení diod vůči polopropustným zrcadlům

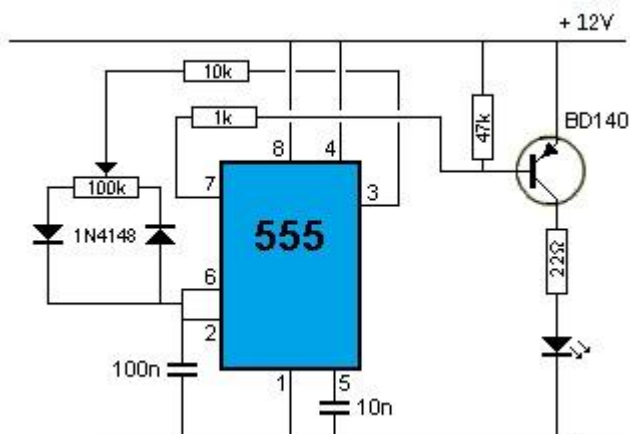
V našem případě využíváme jako zdroje světla 0,5 W LED červené, zelené a modré barvy. Tyto LED diody jsou nasměrovány na Dichroické filtry. Kvůli rozpočtovému omezení jsme místo kolimačních čoček použily černé trubičky, které díky své barvě pohlcují veškeré úhly vyzařovaného světla. Díky velkému vyzařovanému úhlu diod, a to 120° , má celý systém velké ztráty, avšak pro náš účel posouzení správného míchání barev, byl tento modelový výkon dostačující. Obr. 5.6 poskytuje náhled na rozvržení zdrojů v levé části podle návrhu a v pravé části na umístění řídicí jednotky.



Obr. 5.6 Náhled rozložení komponentů

5.1.3 S použitím osmi vlnových délek

Řízení nebylo zadáním diplomové práce, ale poměr jednotlivých barev jsme potřebovali mít možnost nastavit. Rozhodl jsem se pro pulzně šířkovou modulaci realizovanou pomocí časovače 555 v zapojení. viz Obr. 5.7



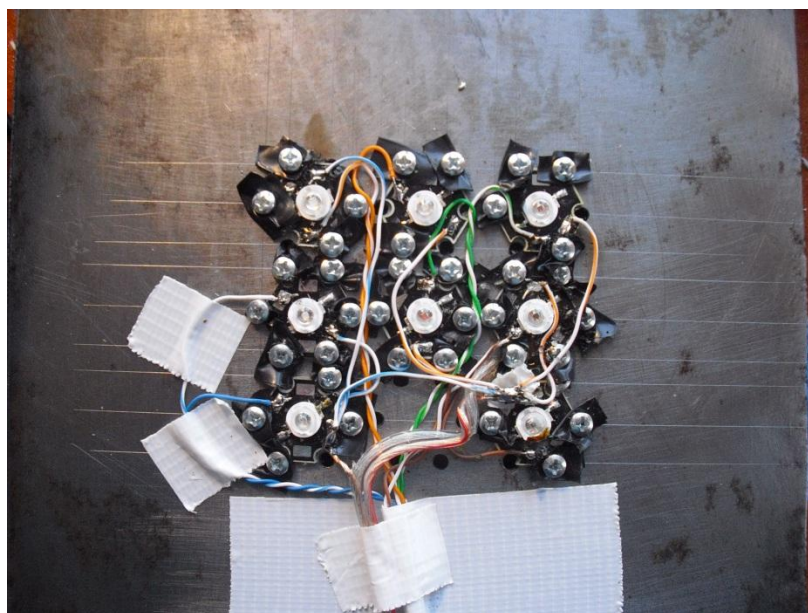
Obr. 5.7 PWM kontrolér

Na desku jsem pomocí kovové jehly narýsoval rastr, následně jsem si důlčičkem vyrazil připravované díry. Při vrtání děr jsem na ochlazování používal olej tak, abych nespálil používaný vrták velikosti 6.



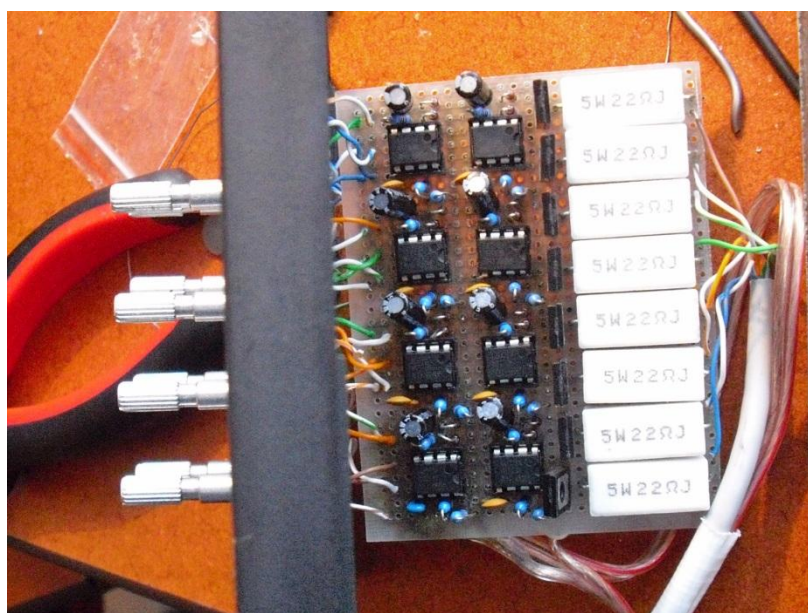
Obr. 5.8 Kovová deska při vrtání

Po vyvrtání děr jsem připevnil pomocí šroubků a matek osm 1 wattových světelných diod s různými vlnovými délkami. Pořadí jsem zvolil tak, aby kopírovalo viditelné barevné spektrum zleva doprava. V této fázi nastal problém ve vodivém spojovacím materiálu. Ten jsem posléze vyřešil černou elektrikářskou izolační páskou, díky které byl obvod chráněn proti případnému zkratu. Všechny diody jsou propojeny s řízením pomocí UTP kabelu, což je dostačující a zároveň cenově dostupná varianta.



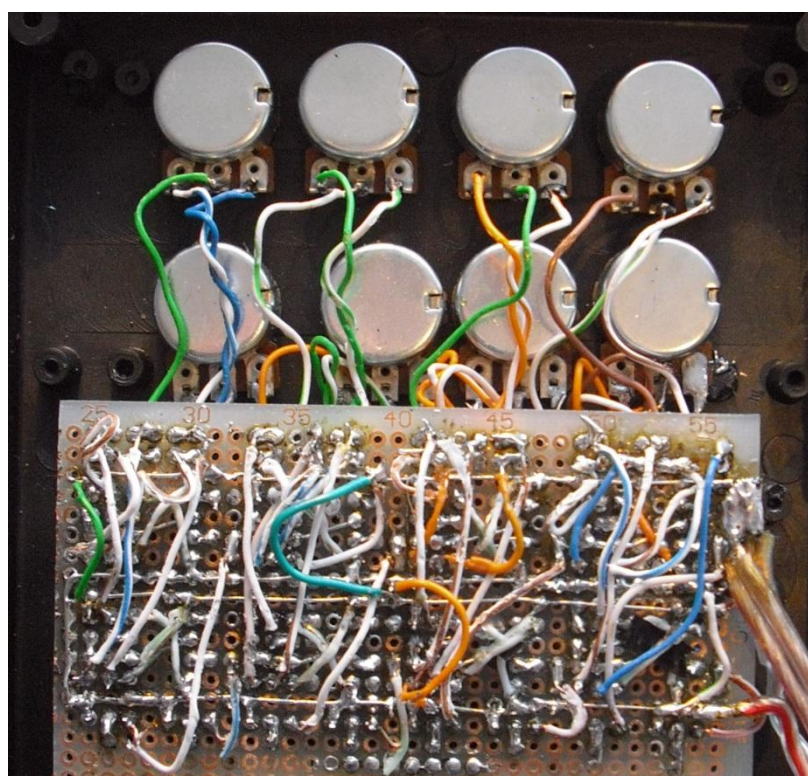
Obr. 5.9 Kovová deska s LED diodami

Osazení desky plošného spoje součástkami dle schématu je vyobrazeno na Obr. 5.10



Obr. 5.10 Deska plošného spoje řídicí jednotky (8x PWM)

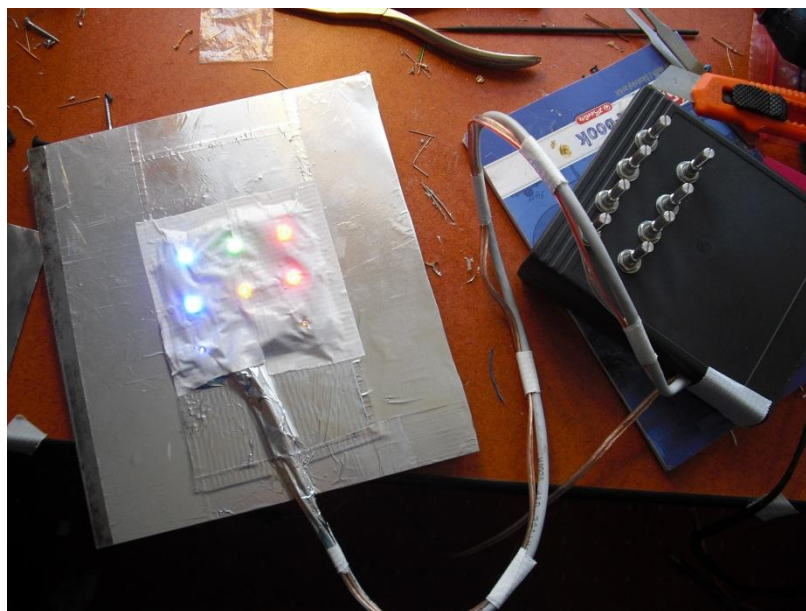
Pro vytvoření desky plošných spojů jsem zvolil pájivé pole, kde jsem pomocí drátování vytvářel jednotlivé cesty plošného spoje. Následující Obr. 5.11 ukazuje výsledné zhotovení desky plošného spoje.



Obr. 5.11 Ukázka drátování a pájení

Obr. 5.12 prezentuje konečný stav výrobku. Ten se skládá ze dvou částí, a to kovové desky s LED diodami (na obrázku vlevo) a řídicí analogovou jednotkou (vpravo).

Intenzita jednotlivých světlo-emitujících diod lze regulovat pomocí potenciometrů. Každý z nich ovládá poměr střidy od 5%-95% a tím řídí efektivní hodnotu napětí, které otevírá nebo přivírá diodu.



Obr. 5.12 Finální výrobek 8xPWM

5.2 Měření spektrálních charakteristik

5.2.1 Spektrometr: „Red Tide USB650 UV“

Pro měření jsem používal spektrometr „Red Tide USB650 UV“ od firmy Ocean Optics, který disponuje vlnovým rozsahem od 350nm do 1000nm a využívá aktivních 650 obrazových bodů (jeden obrazový bod na nanometr spektra). Díky jednoduché obsluze a manipulaci je vhodný pro naučná měření spektrální složek (barev). Výrobce tento měřicí přístroj doporučuje do školních a vzdělávacích laboratoří.



Obr. 5.13 Spektrometr RED TIDE USB650 UV

Technické specifikace tohoto spektrometru jsou udány následující Tabulka 4.

Fyzikální	
Rozměry v mm):	89,1 x 63,3 x 34,4
Hmotnost:	190 g
Detektor	
Typ:	Lineární CCD křemíku pole
Pixelů:	650 pixelů povolenou
Velikost pixelu:	14 um x 200 um
Pixel i hloubka:	~ 62500
Citlivost:	75 fotony / počítat při 400 nm
Optická lavice	
Design:	f / 4, asymetrický překročil Czerny-Turner
Ohnisková vzdálenost:	42 mm vstup, výstup 68 mm
Vstupní otvor:	25 um široké štěrbinu
Fiber Optic Connector:	SMA 905
Spektroskopické	
Rozsah vlnových délek:	350-1000 nm
Optické rozlišení: n ::	~ 2,0 nm FWHM
Odstup signál-šum:	250:1 (při plném signálu)
A / D rozlišení:	12 bit
Temný šum:	3.2 RMS se počítá
Dynamický rozsah:	2 x 10 ^ 8, 1300:1 pro jednu akvizici
Integrační čas:	3 ms až 65 s (15 s typickým max)
Rozptýleného světla:	<0.05% @ 600 nm, <0.10% @ 435 nm
Opraveno linearita:	> 99,8%
Počítač	
Operační systémy:	Windows 98/Me/2000/XP, Mac OS X a Linux w / USB
Obslužný software (povinné):	SpectraSuite spektroskopie Software

Tabulka 4 Specifikace (převzato z[30])

Firma Ocean Optics dodávají své výrobky se softwarem SpectraSuite. Tento software funguje na operačních systémech Windows, Mac OS a Linux. Rozhraní se přizpůsobí danému operačnímu systému, dokáže tak udržet intuitivní ovládání pro uživatele, který je zvyklý na dané rozložení ovládacích prvků daného operačního systému. Je založen na softwarové platformě jazyku Java spektroskopie. Modulární software dokáže jednoduše řídit jakýkoliv Ocean Optics USB spektrometr a zařízení. Poskytuje grafické a číselné hodnoty spekter z každého spektrometru. Pomocí SpectraSuite, můžete kombinovat data z více zdrojů pro aplikace, které zahrnují upwelling / downwelling měření, dvojího odrazu paprsku a monitorování procesů.



Obr. 5.14 Logo Spectra Suite software (převzato z [30])

Barevné schopnosti v SpectraSuite

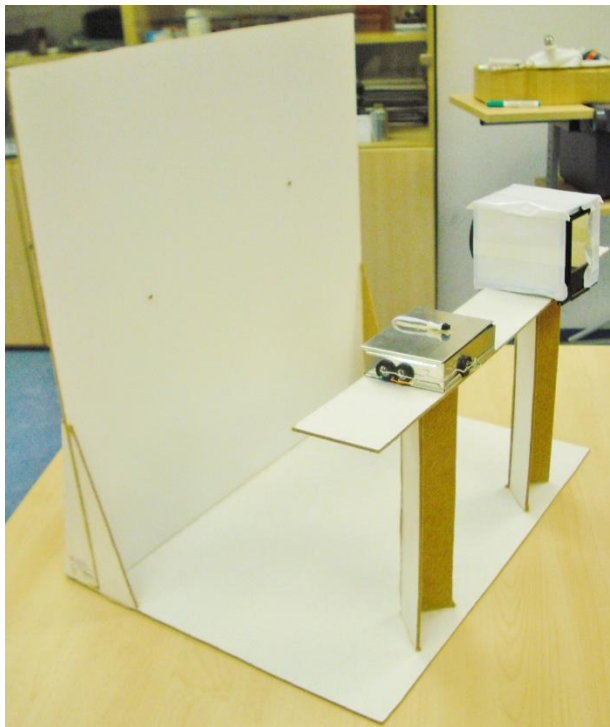
- Reflexní a emisní barvy
- CIE 1931 a CIE 1965 pozorovatelů
- CIE osvětlovací A, B, C, D50, D55, D65, D75, E (jednota), F1-F12
- CIE x, y diagram chromatičnosti
- CIE XYZ
- Index podání barev (CRI)
- Obecné CRI Ra
- Speciální CRI R1-R15
- Teplota chromatičnosti (CCT)
- Dominantní vlnová délka a čistota
- $u'v'w'$, U, V odstín úhel, U, V saturace
- CIE bělost a odstín
- CIELAB ($L^* a^* b^*$, odstín úhlu, chroma)
- Hunter Lab

Peak metriky v SpectraSuite

- Vlnová délka
- Integrální
- Pixel Full-šířka v polovině-Max (FWHM)
- Vlnová délka FWHM
- 90% šířky pásma
- Pixel FWQM
- Špičková vlnová délka
- Špičkové měření pixelů

5.3 Měřící komponent

Na Obr. 5.15 je vyfocen sestavený měřící komponent pro měření při zachování stejné geometrie rozložení zdroje a přijímače (optické vlákno spektroskopu). Tento komponent se skládá z bílého sololitu o tloušťce 3mm. Přední největší deska měří 500x500mm, začátek stojanu pro upevnění světelných zdrojů je od desky vzdálen 250mm ve výšce 250mm. Optické vlákno spektrometru jsem umístil do osy vyzařování. Deska slouží nejen jako ukotvení optického vlákna, ale také jako pozorovací plocha rozložení barev a teoretické smíchání v barvu bílou.

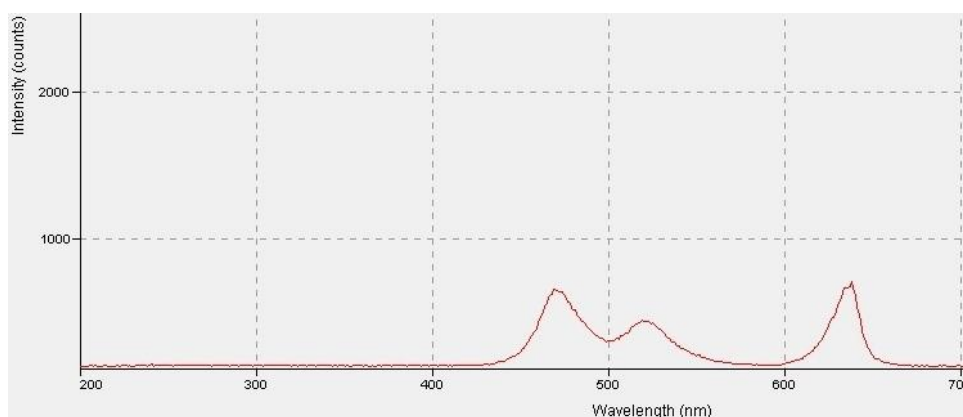


Obr. 5.15 Měřící komponent

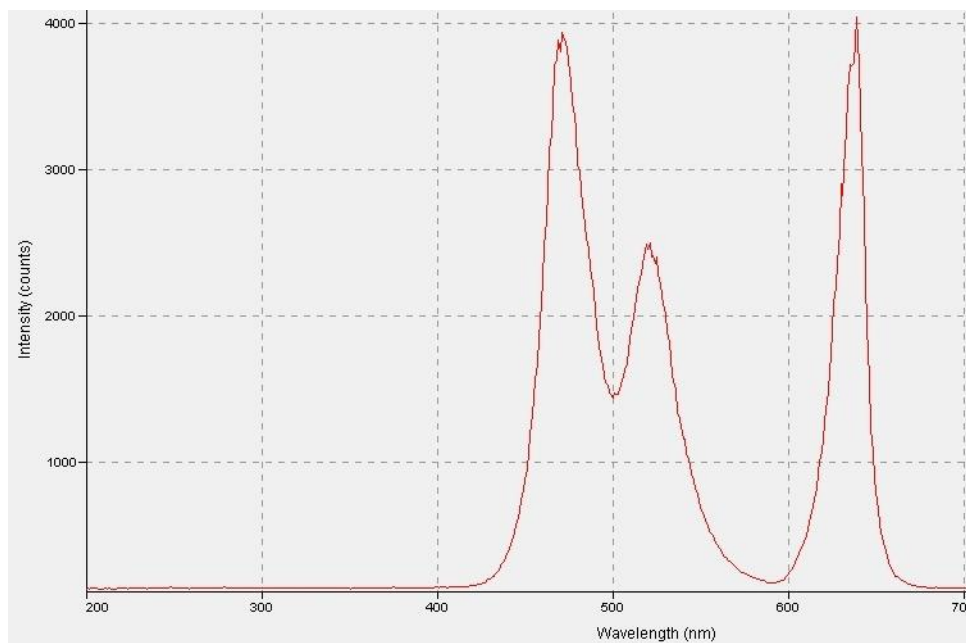
5.4 S použitím LED-RGB

5.4.1 Bez použití optického nastavce

První graf *Obr. 5.16* ukazuje spektrální charakteristiku měřeného modelu bez optického nastavce s integračním časem 8ms. Integrační čas je zde zvolen stejně jako u ostatních měření s běžně prodávanými optickými nastavci tak, aby bylo možno jasně porovnat rozdíly výkonnosti prostupu a míchání barev ve stejném bodě. Druhý graf *Obr. 5.17* má zvolen odlišný integrační čas (60 ms) díky malé intenzitě světelného zdroje.



Obr. 5.16 LED-RGB bez nastavce Integrační čas 8ms



Obr. 5.17 LED-RGB bez nastavce Integrační čas 60ms

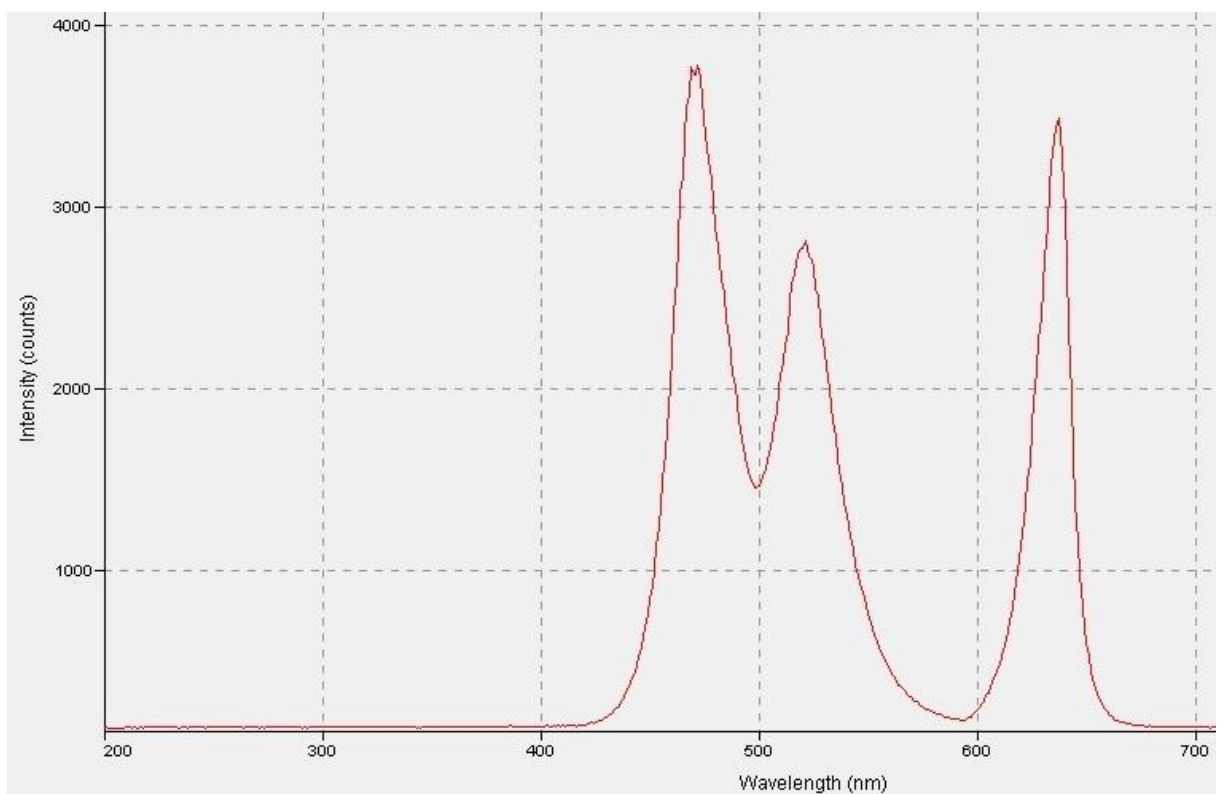
5.4.2 Bodový optický nástavec

Bodový optický nástavec je doporučován právě se spojením s LED-RGB.



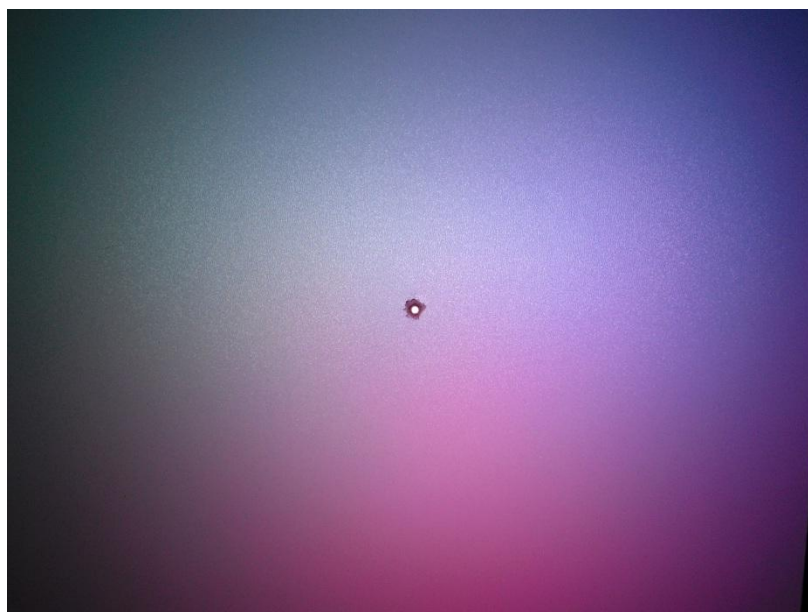
Obr. 5.18 Bodový optický nástavec (převzato z [27])

Poměr jednotlivých spektrálních složek Obr. 5.19 je stejný vůči poměru u měření bez optického nástavce. Díky větší intenzitě by se mohlo zdát, že použití bodového optického nástavce je bez ztrát, ale větší účinnost je dána usměrňující parabolou. Dále porovnávám účinnosti jednotlivých nástavců vůči sobě.



Obr. 5.19 Spektrální charakteristika LED-RGB s bodovým optickým nástavcem (Integrační čas 8ms)

Jak je vidět na *Obr. 5.20* míchání barev je z ostatních optických nástavců nejlepší, ale v praxi k osvětlování bílým světlem je promíchání nedostačující.



Obr. 5.20 Fotka rozložení barev při použití bodového optického nástavce

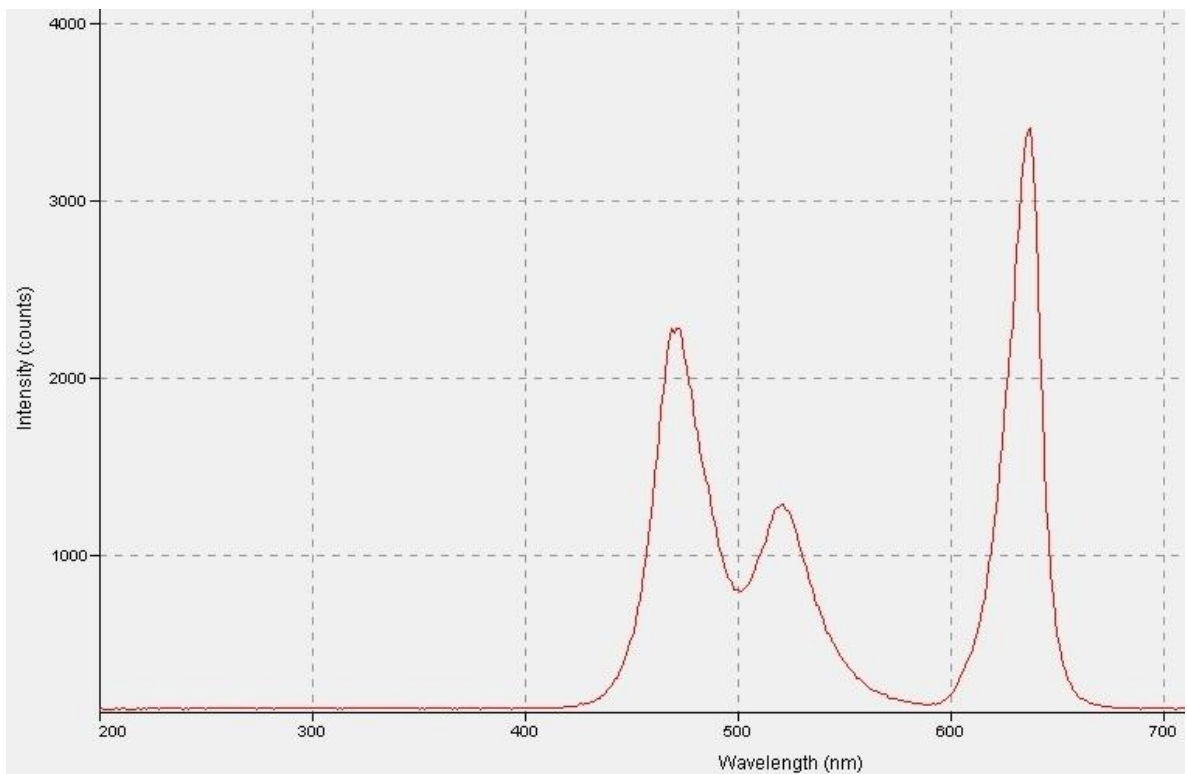
5.4.3 Difuzní optický nástavec

Difuzní nástavec je druhý v pořadí, co se týče použitelnosti pro míchání barev červené zelené a modré.



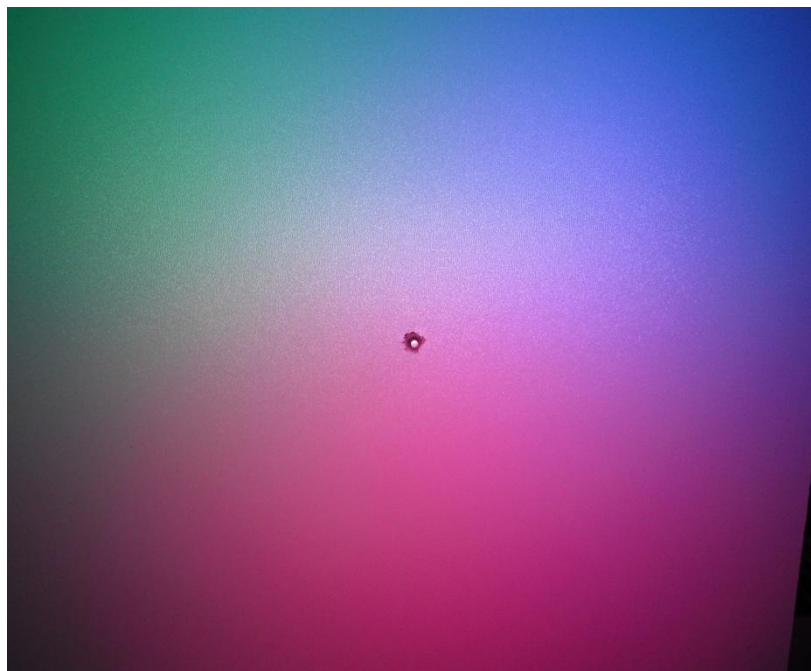
Obr. 5.21 Difuzní optický nástavec (převzato z [27])

Ze spektrální charakteristiky je vidět nepřesnost výrobku v úhlu vyzařování a tím nerovnoměrného poměru barev při stejném nastavení řízení. I při kontrole na Obr. 5.22 je patrné, že osa vůči světelnému zdroji neboli optické vlákno spektrofotometru se nachází v části osvětlené plochy do červena, což potvrzuje měření spektrální charakteristiky.



Obr. 5.22 Spektrální charakteristika LED-RGB s difuzním optickým nástavcem (Integrační čas 8ms)

Obr. 5.23 zřetelně ilustruje rozložení základních barev zrcadlově otočených vůči umístění jednotlivých čipů barev v diodě.



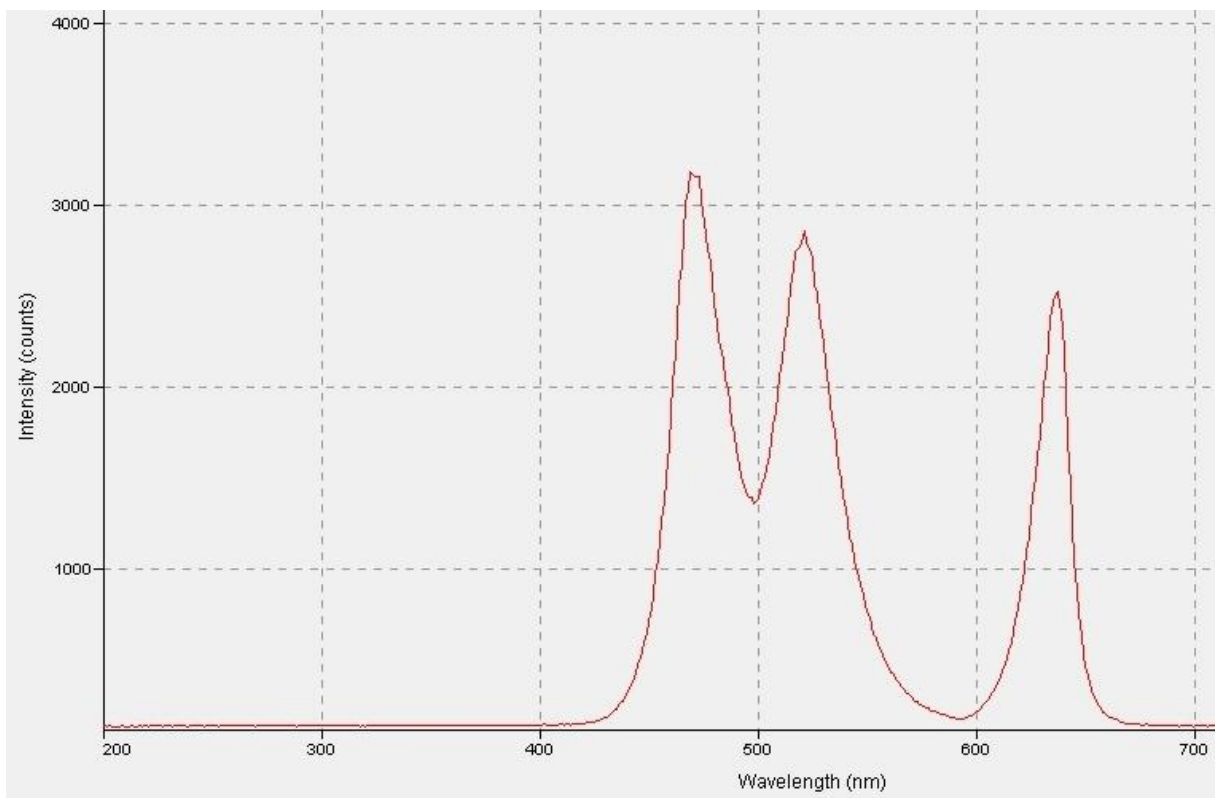
Obr. 5.23 Fotka rozložení barev při použití difuzního optického nástavce

5.4.4 Pruhovalý optický nástavec

Pruhovalý optický nástavec se pro míchání barev s použitím LED-RGB vůbec nehodí. Už jeho jméno předurčuje funkci vyzáření pruhů a to při třech čípech různých barev.



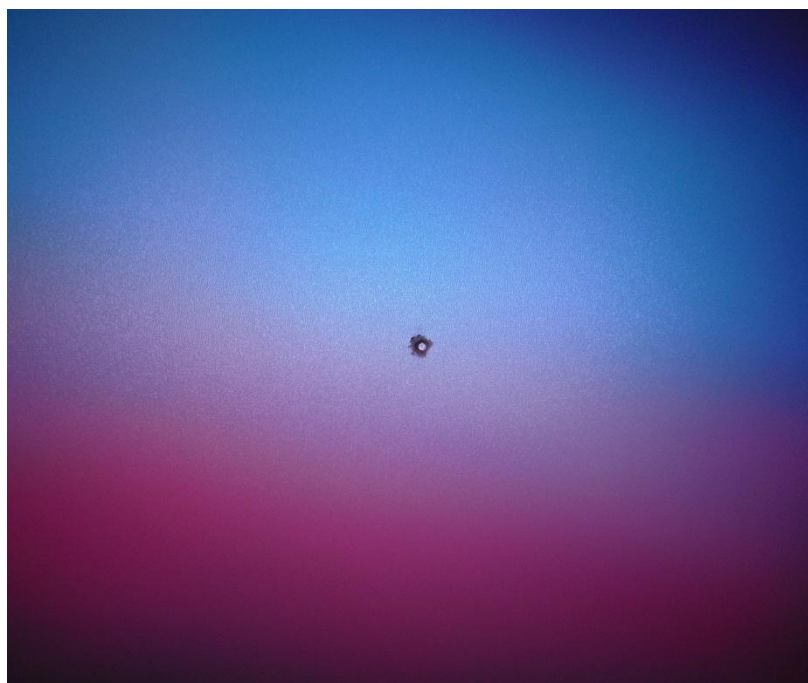
Obr. 5.24 Pruhovalý optický nástavec (převzato z[27])



Obr. 5.25 Spektrální charakteristika LED-RGB s pruhovalým optickým nástavcem (Integrační čas 8ms)

V tomto případě je názorně vidět důležitost geometrického rozložení čipů v LED diodě, i když by se mohlo zdát, že při takto malých rozměrech a vzdálenostech rozmístění od sebe, by bylo zanedbatelné. Na

Obr. 5.26 je vidět absence zelené barvy, avšak ve skutečnosti tomu tak není. Zelená barva je překryta ostatními a tím vytváří bílé světlo.



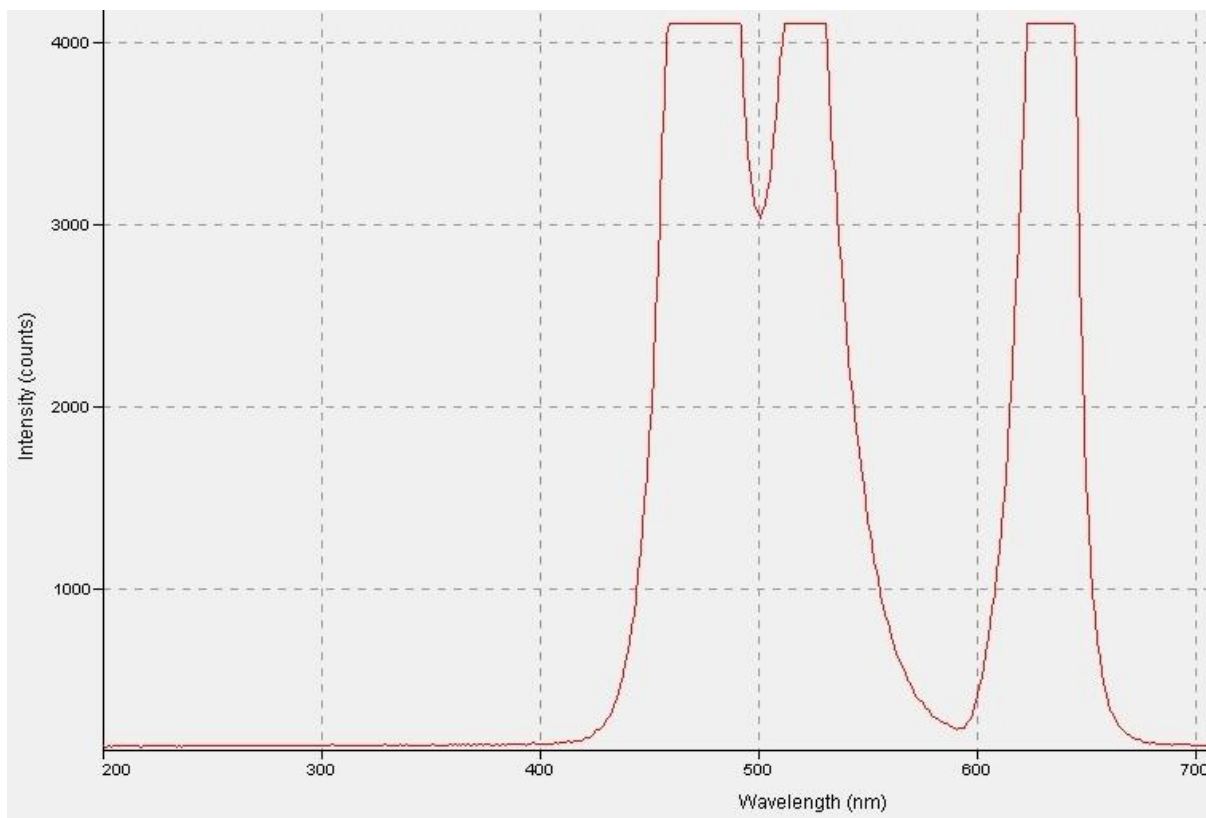
Obr. 5.26 Fotka rozložení barev při použití bodového optického nástavce

5.4.5 Optický nástavec s vyzařovacím úhlem 15°

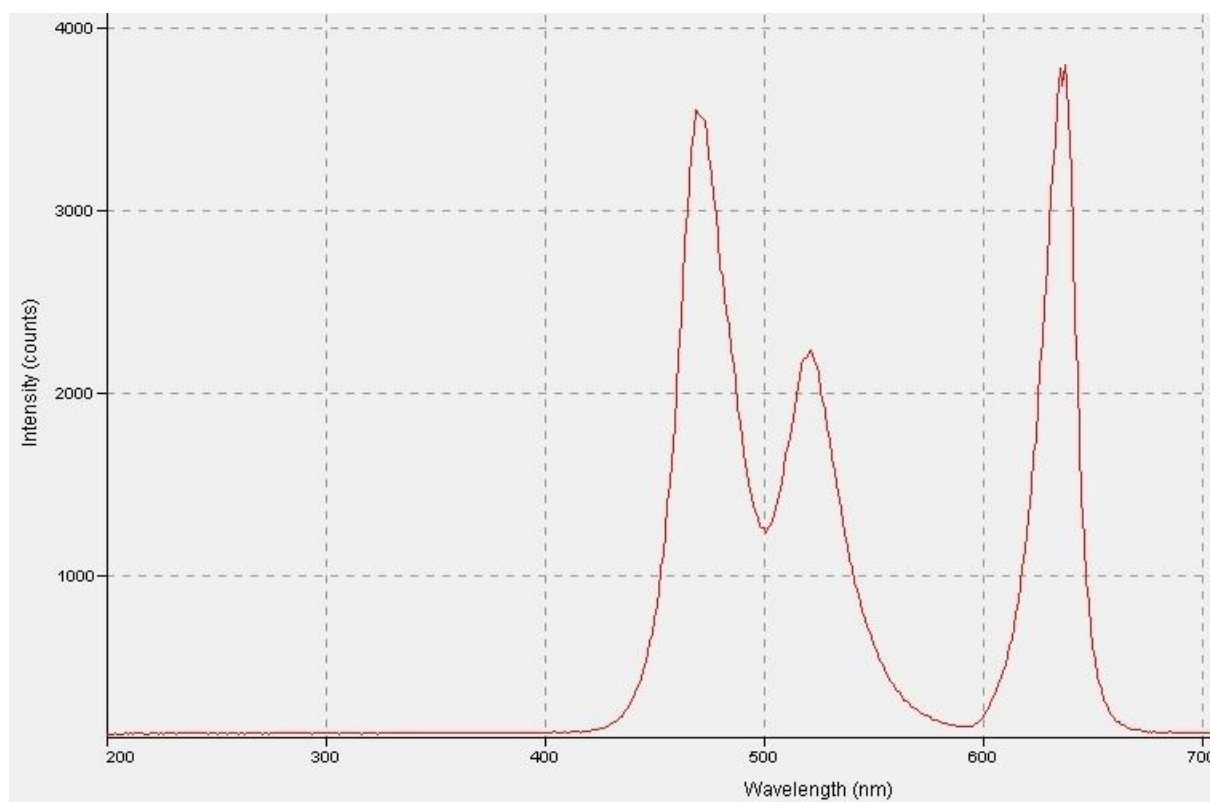
Optický nástavec s vyzařovacím úhlem 15° není určen k míchání barev, ale díky spojitě lupě se barvy mají tendenci míchat.



Obr. 5.27 Optický nástavec s vyzařovacím úhlem 15° (převzato z [27])

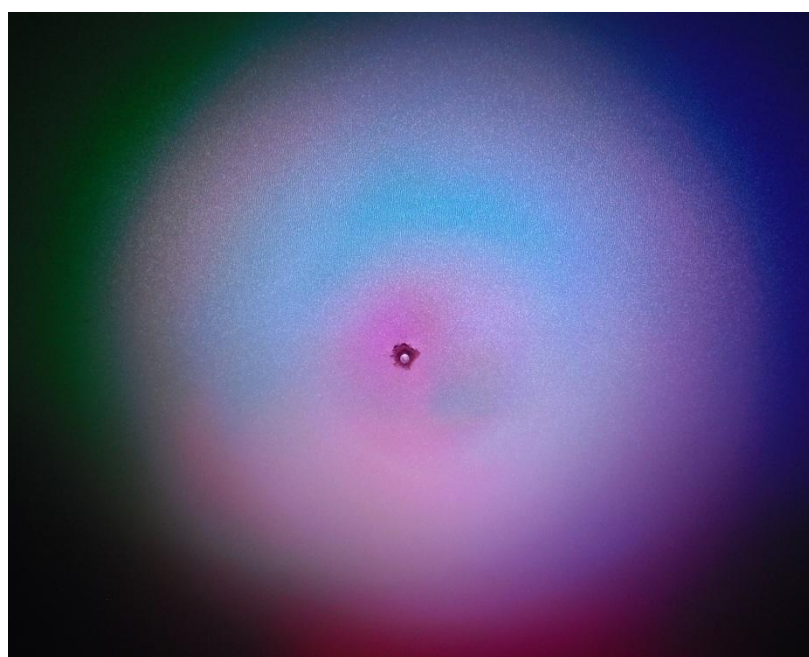


Obr. 5.28 Spektrální charakteristika LED-RGB s úhlem vyzařování 15° (Integrační čas 8ms)



Obr. 5.29 Spektrální charakteristika LED-RGB s úhlem vyzařování 15° (Integrační čas 3ms)

Na Obr. 5.30 je vidět kruhové promíchání barev a tím vytvoření barvy bílé s ohraničením ostatních základních barev.



Obr. 5.30 Fotka rozložení barev při použití s úhlem vyzařování 15°

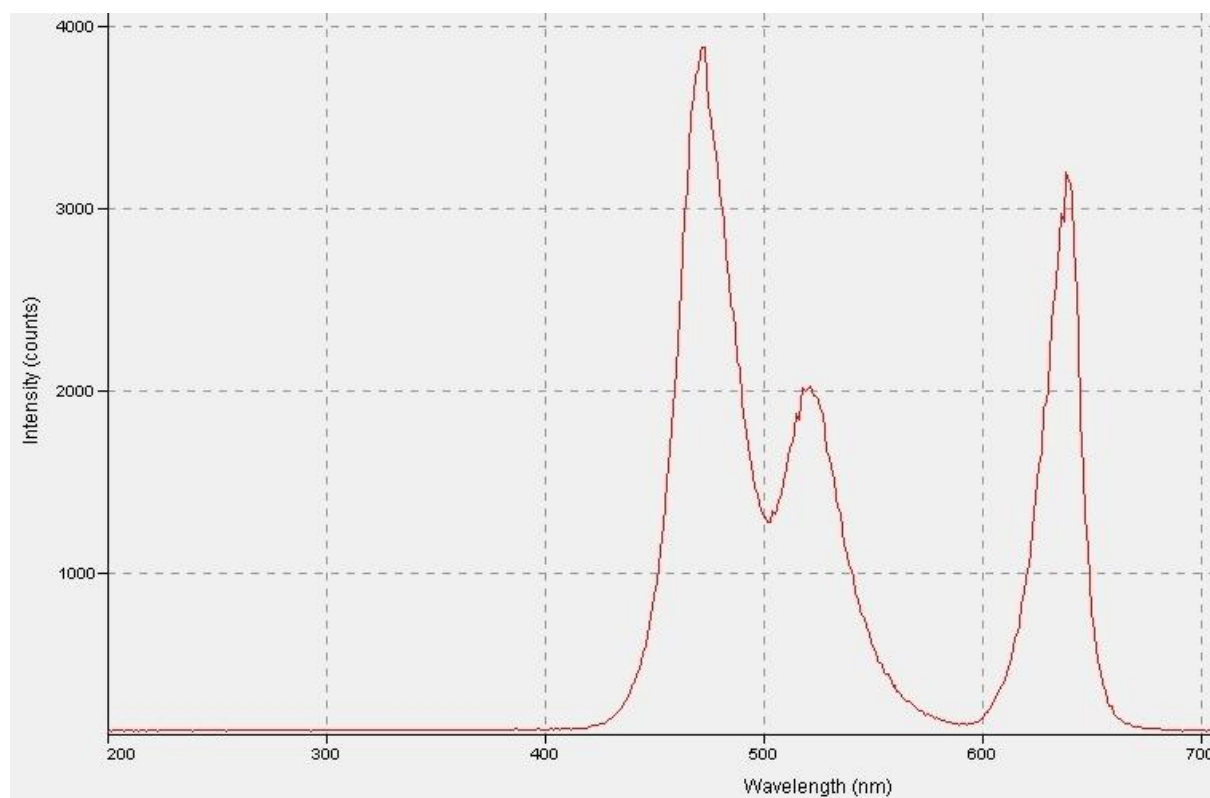
5.4.6 Vlastní optický nástavec

K realizaci vlastního optického nástavce jsme použili lupu průměru 60mm s 5 dioptriemi.



Obr. 5.31 Použitá lupa (převzato z[31])

Spektrální průběh má stejný poměr barevných složek jako bodový nástavec a nástavec směrový pod úhlem 15° .



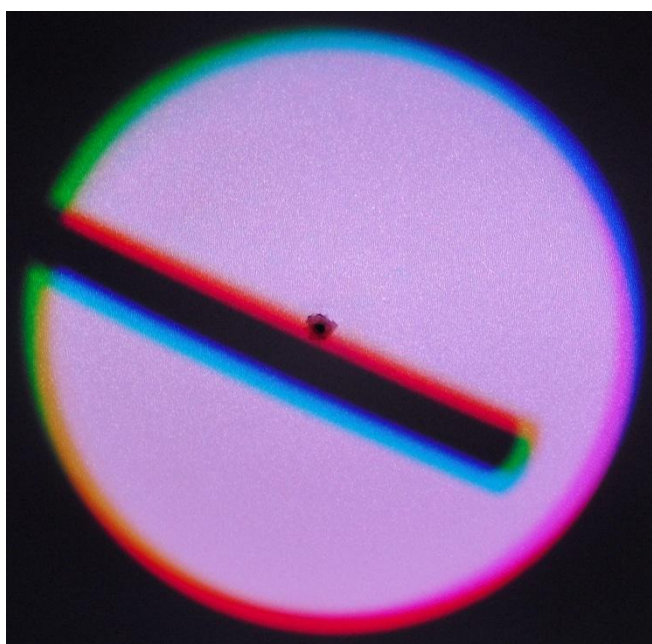
Obr. 5.32 Spektrum při použití vlastního optického nástavce (integrační čas 31ms)

Pozorováním a porovnáním fotek docházím k závěru, že námi zvolená varianta pro míchání barev vyšla nejlépe - viz *Obr. 5.33*.



Obr. 5.33 Fotka rozložení barev při použití vlastního nástavce

Problém tohoto použití je při osvětlení jakékoliv překážky viz *Obr. 5.34*, kdy se vytváří polostíny a díky složení bílé barvy ze tří vlnových délek se jednotlivé polostíny projevují základními i doplňkovými barvami.

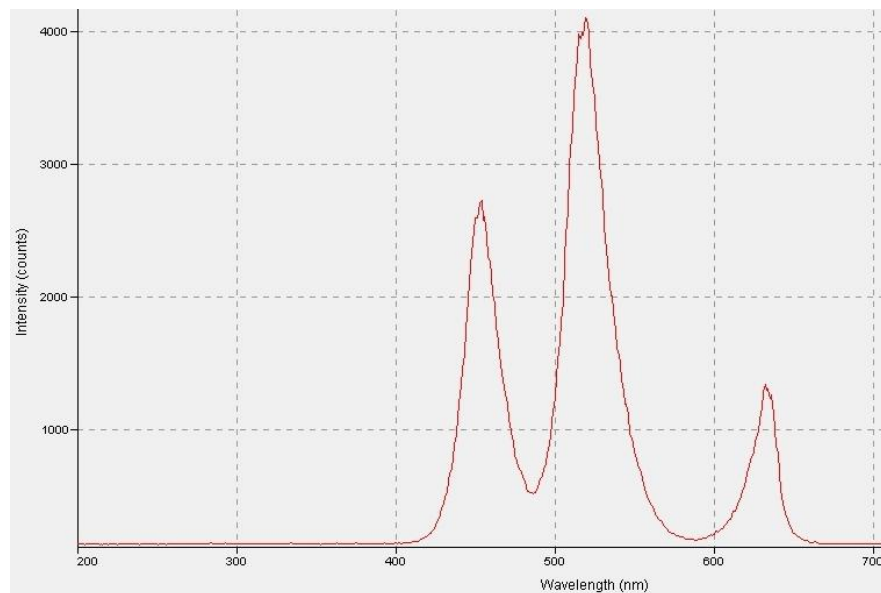


Obr. 5.34 Fotka rozložení barev při použití vlastního nástavce s překážkou

Tento problém řeším v modelové aplikaci s použitím Dichroických filtrů v následné kapitole.

5.5 S použitím polopropustných zrcadel

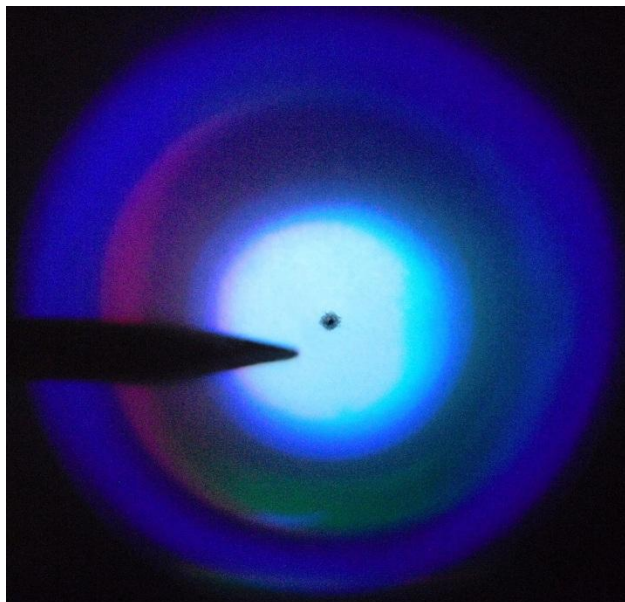
Už ze spektrální charakteristiky jsou vidět velké rozdíly v jednotlivých světelných zdrojích realizovaných 0,5 wattovými LED diodami. V předešlé kapitole „Konstrukce“ jsme vysvětlovali nahrazení kolimační čočky a paraboly černou trubičkou kvůli zmenšení výrobních nákladů. Toto omezení se promítlo do měření.



Obr. 5.35 Spektrum při použití polopropustných zrcadel (integrační čas 80ms)

Díky vynechání kolimačních čoček jednotlivé zdroje vyzařují v kuželech pod úhly. Díky použití černých trubiček jsem tyto úhly ze 120° velmi zmenšil avšak na úkor účinnosti jednotlivých zdrojů.

Na Obr. 5.36 jsou vidět jednotlivé barvy v kruzích. Je tomu tak navzdory stejným omezovačům vyzařování. Rozdílné vzdálenost kuželů světla zapříčiní odlišné kruhové plochy jednotlivých barev.

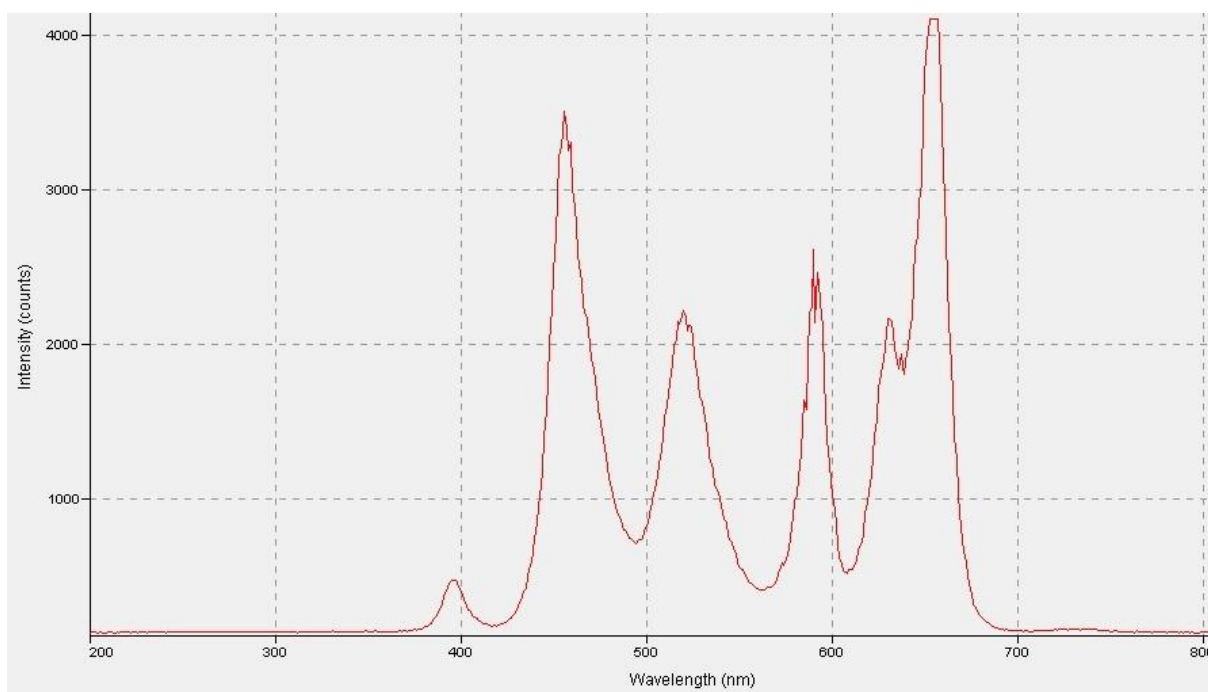


Obr. 5.36 Fotka rozložení barev při použití polopropustných zrcadel s překážkou

Přínosem je jistě ověření skutečnosti, že v případě použití principu skládání barev pomocí Dichroických filtrů se nevytváří polostíny a tím se bílé světlo nerozkládá na ostatní barvy.

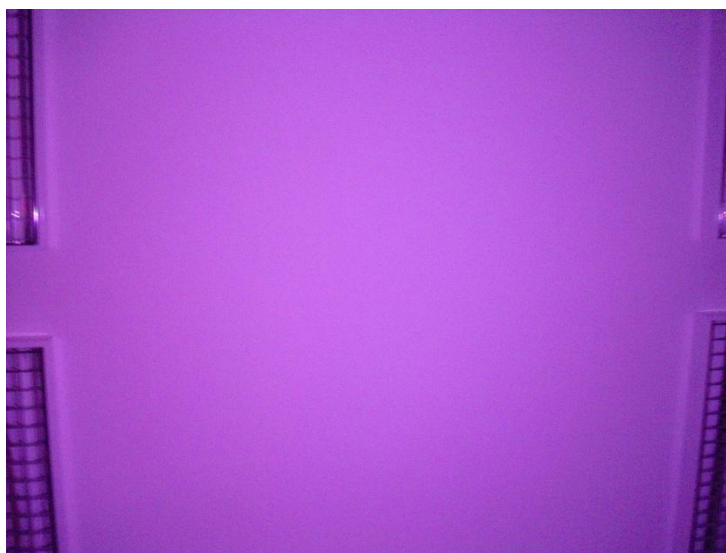
5.6 S použitím osmi vlnových délek

Na spektrální charakteristice je vidět výrazné spojení dvou modrých délek viz druhý výkyv zleva na *Obr. 5.37* a následky poškození IR LED diody, kde je pouze náznak na vlnové délce 730 nm.



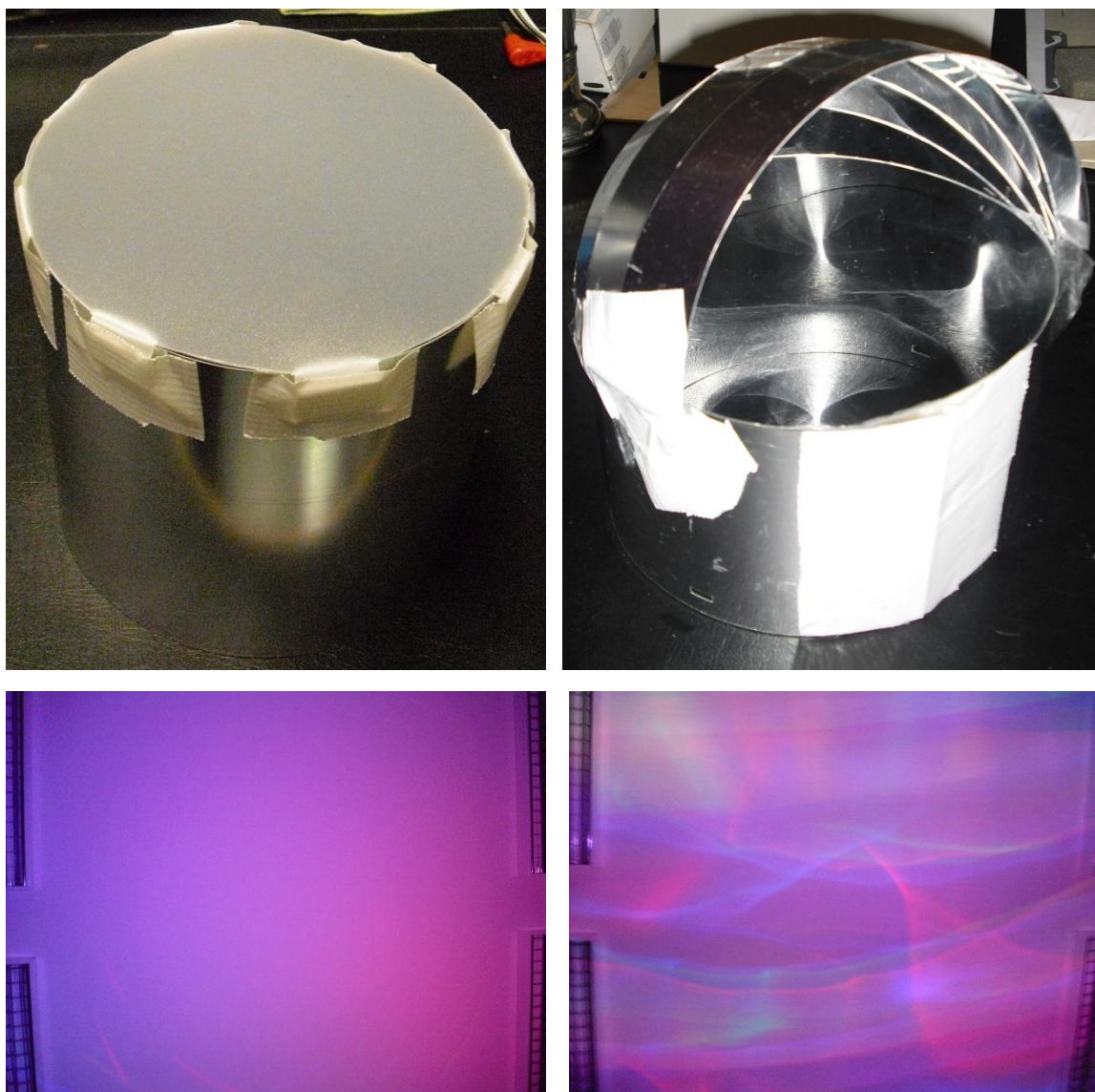
Obr. 5.37 Spektrum při použití osmi vlnových délek (integrační čas 41 ms)

Na *Obr. 5.38* převahuje fialová barva, což je způsobeno velkým zastoupením modré a červené barvy vůči zelené. Bylo by vhodné celý světelný zdroj do budoucna osadit další minimálně jednou 1W zelenou diodou.



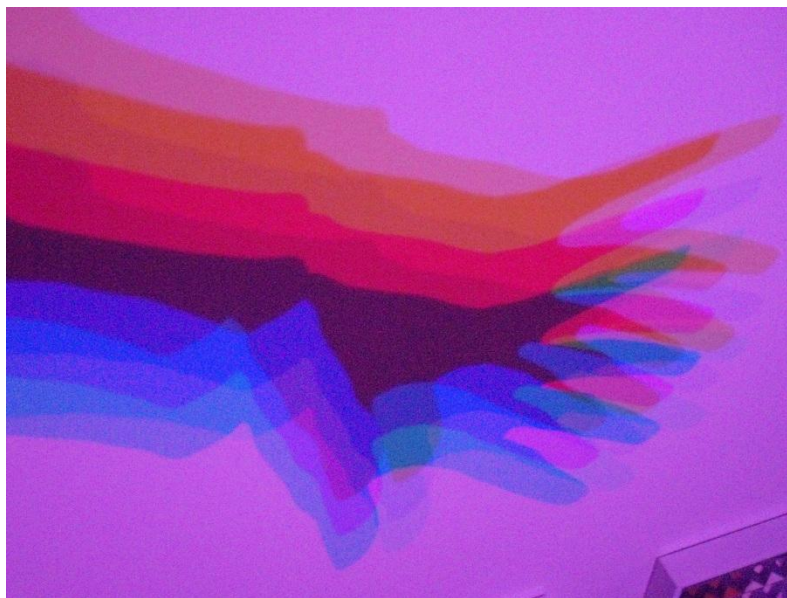
Obr. 5.38 Osm vlnových délek bez optického nástavce

Na levé horní straně *Obr. 5.39* je vyobrazen difuzor vyrobený z leštěného hliníkového plechu s odrazovou účinností 98%, který se používá k výrobě světlovodných tubusů. Na ten jsem připevnil volně dostupný materiál z PVC, který disponuje difuzními vlastnostmi. Na horní pravé straně se nalézá vytvořené koleno z totožného materiálu jako předcházející výrobek. Jeho pomocí jsem chtěl realizovat myšlenku míchání barev pomocí světlovodného tubusu, ve kterém by bylo dle naší domněnky dostatečně mnoho odrazů ke smíchání základních barev. Hlavním problémem bylo, že jednotlivé světelné zdroje se odrážely v bodech a díky délce světlovodného tubusu a vnitřních odrazech vytvářely žihance. Ty jsou vidět na pravém spodním obrázku. U zkonstruovaného difuzoru byly tyto žihance potlačovány difuzivní vrstvou, ale přesto byli patrné.



Obr. 5.39 Optické nástavce a zobrazení jejich působení na optické záření

Na závěr bych rád dokázal, že používaný zdroj je složen z více jednotlivých monochromatických zdrojů. Tuto skutečnost zobrazuje *Obr. 5.40*, kde jsem použil jako překážku narušující proud světelného záření ruku. Je zde také vidět míchání barev. V tomto případě nebylo použito žádného optického nástavce.



Obr. 5.40 Ruka jako překážka dokazující existenci zdroje složeného z většího počtu monochromatických zdrojů

6 Měření teploty chromatičnosti

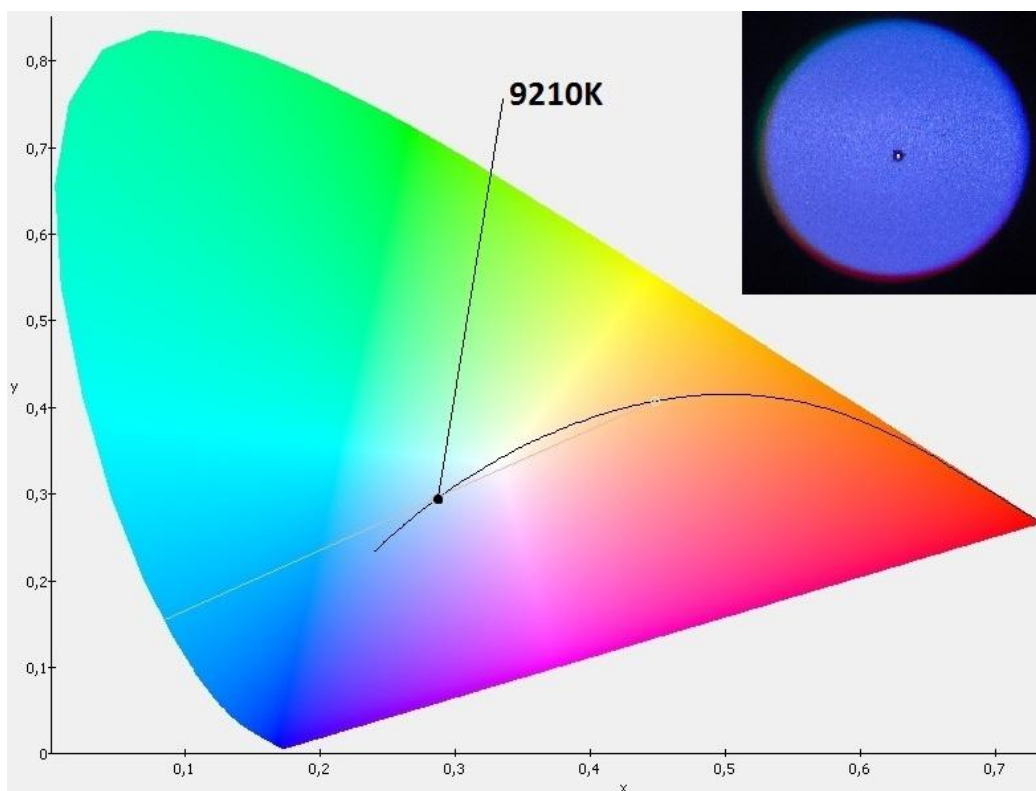
Měření teploty chromatičnosti jsem prováděl na stejném zařízení jako v předešlé kapitole – na spektrometru RED TIDE USB650 UV. Před započítím měření teploty chromatičnosti se měřicí přístroj pomocí softwaru kalibruje, a to ve fázi jak zapnutého tak i vypnutého (měření rušivého pozadí) zdroje. Kalibraci provádí software v automatickém režimu, uživatel pouze ovládá zdroj světla. Z hlediska barevných tónů světla se bílá světla řadí na základní tři kritéria.

Barevný tón světla	Náhradní teplota chromatičnosti T_c [K]
teple bílý	do 3 300
neutrálně bílý	3 300 až 5 300
chladně bílý	nad 5 300

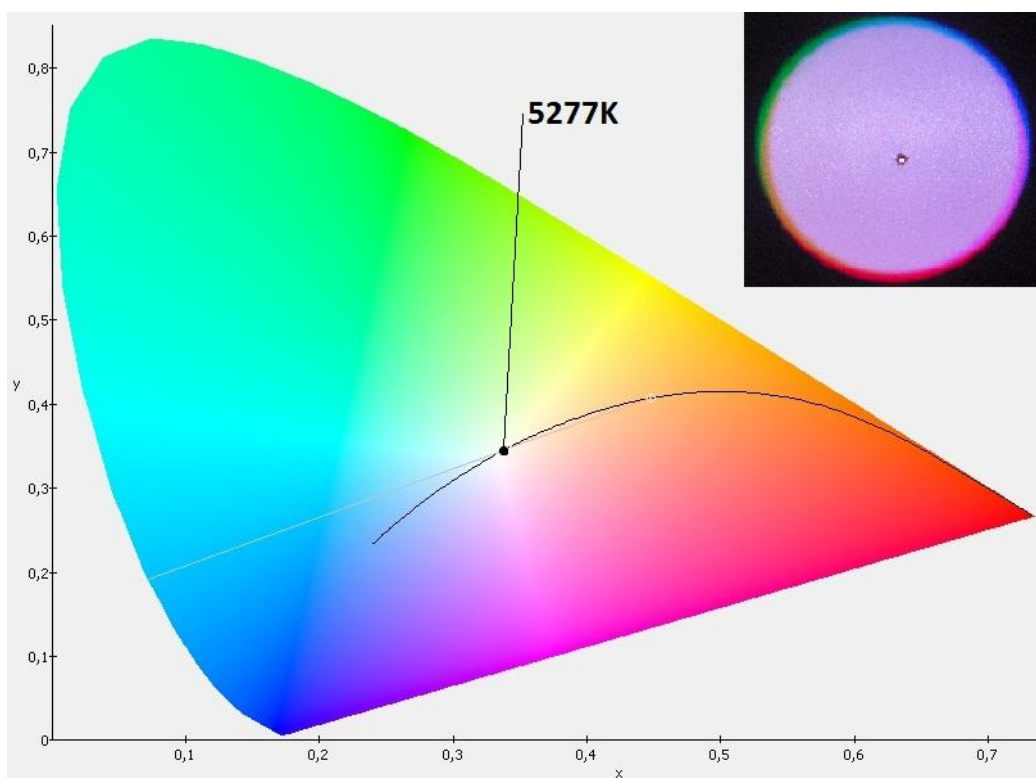
Tabulka 5 Tabulka základních barevných tónů podle teploty chromatičnosti

Následující tři obrázky ukazují výsledky měření teplot chromatičnosti různých tónů bílého světla, v postupném pořadí od chladného, přes neutrální až k teplému tónu. Když srovnám

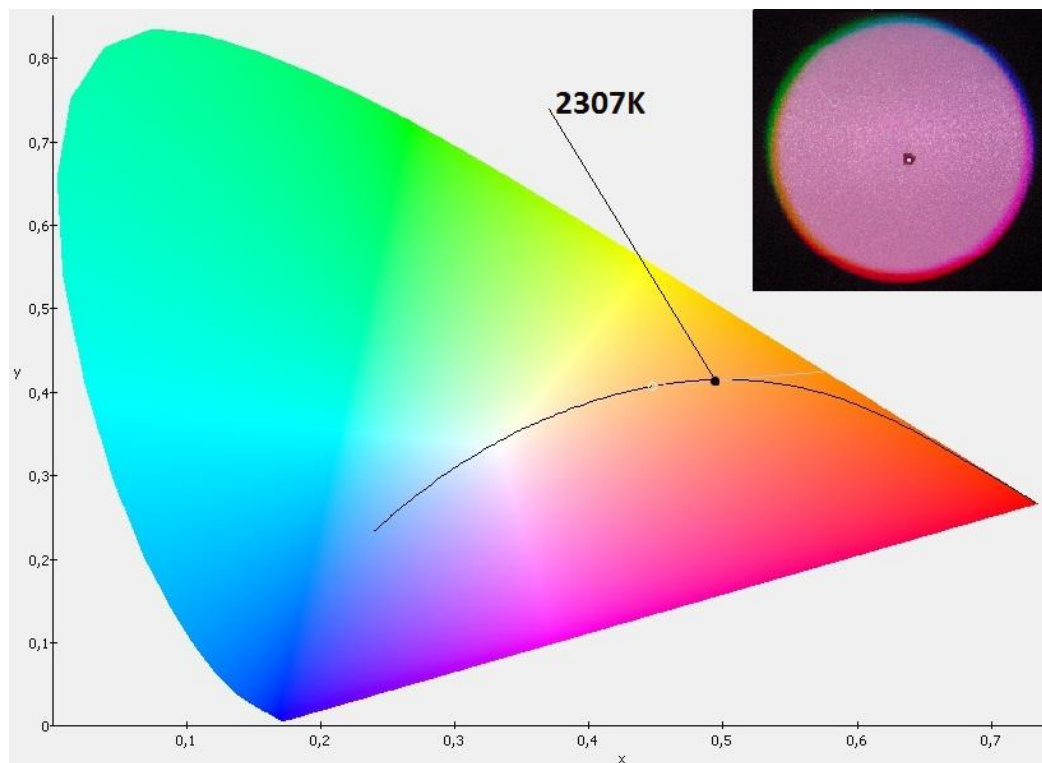
naměřené hodnoty s odpovídajícím rozmezím teplot chromatičnosti uvedeném v Tabulka 5, tak je patrné, že výsledky doopravdy odpovídají.



Obr. 6.1 Naměřená teplota chromatičnosti při nastavení LED-RGB zdroje na chladně bílý tón



Obr. 6.2 Naměřená teplota chromatičnosti při nastavení LED-RGB zdroje na neutrálně bílý tón



Obr. 6.3 Naměřená teplota chromatičnosti při nastavení LED-RGB zdroje na teple bílý tón

7 Závěr

V zadání této diplomové práce s názvem „Návrh LED-RGB světelného zdroje“ jsem měl za úkol zpracovat přehled způsobů vytváření bílého světla pomocí LED diod s vysvětlením principu vzniku záření a jeho případnou transformací do oblasti viditelného světla. Dále jsem měl vyhodnotit vlastnosti jednotlivých světlo-emitujících diod a popsat jejich spektrální charakteristiky. Na principu vytvoření bílé barvy pomocí skládání světelných barev červené, zelené a modré zhotovit prototyp světelného zdroje. V úvodu a následné kapitole „Historie“ jsem uvedl významné mezníky při vývoji polovodičů. Počátek se přisuzuje Henry Josephu Round (rok. 1907) za objev elektroluminiscence. Tento jev vysvětluje proč LED dioda nebo LED žárovka svítí. Pásmo spektra záření diody je závislé na chemickém složení použitého polovodiče. V roce 1962 vyvinul první prakticky použitelnou LED diodu kanadský vědec Nick Holonyak. Zájem se začal ubírat o III. – V. skupinu periodické tabulky prvků. O třicet let později a to roku 1991 -1992 byli vyvinuty modré a zelené diody. Ze skutečnosti principu funkce LED vyplývá, že nelze přímo emitovat bílé světlo. Připadá tedy možnost využití konvertoru vlnových délek nebo trichromatické skládání červené, zelené a modré barvy. Využívá se fosforescence luminoforů buzeným modrou nebo UV LED diodou. První případ

je energeticky úspornější a v porovnání s LED se třemi čipy i rozměrově menší, avšak ve výsledném modro-žlutém spektru je potlačena zelená a červená složka, což se projevuje horším podáním barev osvětlovaných předmětů. U diod s třípásmovým luminoforem se UV záření vlastní diody ve spektru neprojevuje a výsledný index podání barev Ra dosahuje hodnot nad 80[-]. To jsou dva možné způsoby jak vyrobit bílý zdroj světla pomocí LED s konvertorem vlnových délek následně poslední možnost je skládání bílého světla z červené, zelené a modré barvy. Tento způsob vychází z citlivosti lidského zraku na poměr tří základních barev. Adaptivní míchání jsem využil jako základní teorii k vytvoření prototypického světelného zdroje. Kapitulu „Vlastní konstrukce“ jsem si rozdělil na podkapitoly konstrukce a měření. V kapitole „Konstrukce“ popisuji využití řízení se zdrojem používaného k ovládání LED-RGB dizajn pásku, který je upraven pro náš světelný zdroj. Takto jsem realizoval dva modely, ke třetímu jsem vytvořil vlastní řízení pomocí principu analogových elektronických systémů. K vytvoření PWM modulace jsem vybral běžně používaný časovač 555, kde pomocí RC článku nastavuji časovou konstantu a díky dvou diodám a potenciometru reguluji střihu od 5% až po 95%. Všechny tři vytvořené prototypické modely světelných zdrojů jsou plně funkční, můžeme tedy přijít k měření. K měření jsem slepil pomocí tavné pistole se silikonem z bílého sololitu tzv. měřicí komponent. Komponent sloužil k uchycení světelných zdrojů, byli tak umístěny ve stejné vzdálenosti od pozorovací plochy. K prvnímu modelu s využitím LED-RGB jsem koupil běžně prodávané optické nástavce a podrobil je měření.

1. Měřením bez optického nástavce vyšlo podle předpokladu s nejnižší intenzitou vůči měřenému bodu díky absenci paraboly, která by světelný výkon soustředila.
2. U doporučeného bodového nástavce pro LED-RGB je vidět že v našem měření vyšel co do míchání barev vůči ostatním optickým nástavcům nejlépe, ale v praxi k osvětlování bílým světlem bych shledal jeho promíchání za nedostačující. Disponoval nejnižším útlumem.
3. Z měření difuzního optického nástavce je vidět nepřesnost výrobku v úhlu vyzařování a tím nerovnoměrného poměru barev při stejném nastavení poměru barev řízením. I při kontrole na *Obr. 5.22* je patrné, že osa vůči světelnému zdroji neboli optické vlákno spektrofotometru se nachází v části osvětlené plochy do červena, což potvrzuje měření spektrální charakteristiky. Difuzor se jeví jako optický nástavec s nejvyšším útlumem.

4. Na případu pruhovaného optického nástavce je názorně vidět důležitost geometrického rozložení čipů v LED diodě, i když by se mohlo zdát, že při takto malých rozměrech a vzdálenostech rozmístění od sebe, by mohla být zanedbatelná. Na
5. *Obr. 5.26* je vidět absence zelené barvy, avšak ve skutečnosti tomu tak není. Zelená barva je překryta ostatními a tím vytváří bílé světlo.
6. Optický nástavec s vyzařovacím úhlem 15° není určen k míchání barev, ale díky spojité lupě se barvy mají tendenci míchat. Na
7. *Obr. 5.30* je vidět kruhové promíchání barev a tím vytvoření barvy bílé s ohraničením ostatních základních barev. Intenzita světla vychází vyšší, zapříčiňuje to hlavní funkce tohoto optického nástavce a to soustředit veškerý světelný výkon LED-RGB na jedno místo. Je jasné, že tím vybočuje z řady a proto není zařazen do porovnání.
8. K realizaci vlastního optického nástavce jsme použili lupu průměru 60mm s 5 dioptriemi. Pozorováním a porovnáním fotek docházím k závěru, že námi zvolená varianta pro míchání barev vyšla nejlépe. Problém tohoto použití je při osvětlení jakékoliv překážky, kdy se vytváří polostíny a díky složení bílé barvy ze tří vlnových délek se jednotlivé polostíny projevují základními i doplňkovými barvami.

Tento problém řeším v modelové aplikaci s použitím Dichroických filtrů v následné kapitole. Ve spektrální charakteristice je vidět veliký rozdíl v intenzitách jednotlivých vlnových délek. Světelné zdroje realizované 0,5 wattovými LED diodami. Pracoval jsem s finančním omezením, které zapříčinilo nahrazení kolimačních čoček a parabol černými trubičkami. Díky použití černých trubiček jsem vyřazovací úhly ze 120° velmi zmenšil avšak na úkor účinnosti jednotlivých zdrojů. Zdroje dále vyzařují pod úhlem v kuželech a díky rozdílným vzdálenostem, které musí jednotlivé barvy světla urazit na společnou pozorovací plochu, se liší velikosti osvícených ploch. I přes tyto omezení jsem měl možnost ověření teorie a vložit do vyzařovaného světla překážku. Běžný ostrý černý stín dokazoval správnost měření a potvrzení očekávání v zabránění rozkladu světla.

Měření na modelu s použitím osmi vlnových délek. Spektrální charakteristice ukazuje všech osm vlnových délek až na IR LED diodu, která následkem poškození, je pouze náznakem vyobrazena na vlnové délce 730 nm. Na *Obr. 5.38* převahuje barva fialová, což je způsobeno velkým zastoupením modré a červené barvy vůči zelené. Na levé horní straně *Obr. 5.39* je vyobrazen difuzor, který jsem vyrobil z leštěného hliníkového plechu s odrazovou účinností 98%. Tento plech se používá k výrobě světlovodných tubusů. Na ten jsem připevnil volně dostupný materiál z PVC, který disponuje difuzními vlastnostmi. Na horní pravé straně

obrázku se nalézá vytvořené koleno z totožného materiálu. Jeho pomocí jsem chtěl realizovat myšlenku míchání barev pomocí světlovodného tubusu, ve kterém by bylo dle mé domněnky dostatečně mnoho odrazů ke smíchání základních barev. Hlavním problémem bylo, že jednotlivé světelné zdroje se odrážely v bodech a díky délce světlovodného tubusu a vnitřních odrazech vytvářel žihance na výstupu. Ty jsou vidět na pravé spodní straně obrázku. U zkonstruovaného difuzoru byly tyto žihance potlačovány difuzní vrstvou, ale i přesto byli patrné. Skutečnost použití zdroje složeného z více jednotlivých monochromatických zdrojů zobrazuje *Obr. 5.40*, kde jsem použil jako překážku narušující proud světelného záření ruku. Je zde také vidět míchání barev. V tomto případě nebylo použito žádného optického nástavce. Bylo by vhodné celý světelný zdroj do budoucna osadit další minimálně jednou 1W zelenou diodou. V dalších zadáních a aplikacích vytvořit řízení pomocí mikro kontroléru s možností ovládání světelného zdroje pomocí vlastního software. A dále se zaměřit na optickou část s propojením s firmou, firmami zabývající se vývojem optických komponentů k světelným zdrojům realizovaných pomocí LED.

Měřením teploty chromatičnosti jsem po kalibraci přístroje dokázal možnost nastavení základních teplot bílého světla u modelu LED-RGB s vlastním optickým předřadníkem.

Chladně bílé 9210K

Neutrálně bílé 5277K

Teple bílé 2307K

Tímto měření byl splněn poslední bod zadání této diplomové práce. Blízká budoucnost ukáže, který z osvětlovacích polovodičových zdrojů dostane efektivnější uplatnění. Vyřeší-li se rychleji velká teplotní závislost vůči efektivitě a bodové oslnění spojené s vyššími náklady na optiku pak se uplatní LED nebo se rychleji vyřeší degradace organických vrstev a tím nízká životnost u OLED to se zatím nedozvíme. Co víme, je skutečnost, že i přes velmi mnoho významných objevů v osvětlovací technice nás stále čeká něco nového.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RICHARD J. D. TILLEY Colour and the Optical Properties of Materials, 2011
- [2] SCHUBERT, E. F.: Light-emitting diodes, Cambridge University Press, 2003
- [3] KIM, Y., HA, Ch.: Advances in Organic Light-Emitting Device, Trans Tech Publications Ltd, 2008
- [4] HABEL, J. a kolektiv: Světelná technika a osvětlování, FCC PUBLIC, 1995
- [5] Josef Linda, Elektrické světlo 1. 1994
- [6] Josef Linda, Elektrické světlo 2. 1994
- [7] Josef Linda, Elektrické světlo 3. 1995
- [8] http://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99echod_P-N
- [9] http://en.wikibooks.org/wiki/Semiconductor_Electronics/Diode/Construction_and_Operation
- [10] <http://elektrika.cz/data/clanky/technologie-led-od-l-po-d>
- [11] <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39810.pdf>, FCC PUBLIC s. r. o., 2009
- [12] <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43461.pdf>, FCC PUBLIC s. r. o., 2011
- [13] <http://cs.wikipedia.org/wiki/RGB>
- [14] <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37589.pdf>, FCC PUBLIC s. r. o., 2008
- [15] <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39809.pdf>, FCC PUBLIC s. r. o., 2009
- [16] Karel Sokanský a kolektiv, Světelná technika, ČVUT Praha, 2011
- [17] Článek History of light-emitting diodes
http://assets.cambridge.org/97805218/23302/excerpt/9780521823302_excerpt.pdf
- [18] http://fotoroman.cz/glossary2/glossary_images/rgb.jpg
- [19] <http://rybicky.net/k/forum/269447.png>
- [20] http://assets1.lookatme.ru/1288529720/assets/article_image-image/e0/e8/1237109/article_image-image-article.jpg
- [21] http://en.wikipedia.org/wiki/Oleg_Losev
- [22] Filip Slovák, Analýza parametrů světlo emitujících diod, ČVUT, 2009
- [23] Robert Krejčí, Eduard Hulicius, Polovodičové lasery a LED-ky, 23.04.2007
<http://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>
- [24] <http://www.imonitory.ic.cz/OLED.html>, 2011
- [25] <http://cs.wikipedia.org/wiki/OLED>, Poslední změna 2012

- [26] <http://osvetle.cz/profesional/6-technikaprofes/441-novy-rekord-vnlaboratoich-cree-254-lmw.html>, 2012
- [27] <http://netmart.cz/detail.aspx?id=68>
- [28] <http://www.paladix.cz/clanky/mereni-a-michani-barev.html>
- [29] http://www.led-tech.de/de/High-Power-LEDs-Cree/CREE-MC-E-Serie-c_120_133.html
- [30] <http://www.oceanoptics.com>
- [31] <http://www.ges.cz/cz/lupa-vtmg1-GES07402716.html>
- [32] http://en.wikipedia.org/wiki/Nick_Holonyak
- [33] <http://www.ledco.cz/led-dioda>