

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

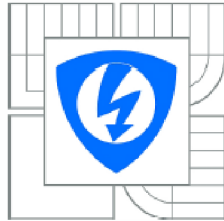
**VLIV TEPLoty NA SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ
PARAMETRY LED**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

PAVEL SLÁMA

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Pavel Sláma
Ročník: 3

ID: 158229
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Vliv teploty na světelně-technické parametry LED

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V této práci se student zabývá vlivem teploty na provozní parametry LED. Student teoreticky popíše podstatu emise světla u LED a provede rešerši v oblasti vlivu teploty na provozní parametry LED. V praktické části navrhne a zprovozní zařízení pro sledování vlivu teploty na parametry LED a provede ověření teplotních vlivů samostatným měřením.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Je vhodné využít odborných článků databází IEEE, Web of Science, SCOPUS a jiné. Další literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Pavelka

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

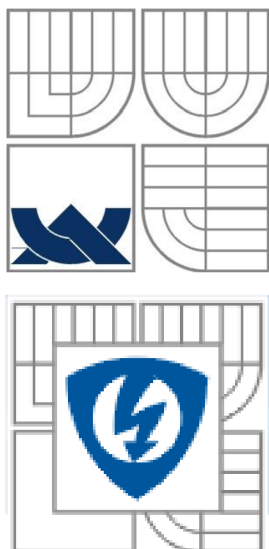
SLÁMA, P. *Vliv teploty na světelně-technické parametry LED*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Pavelka.

Rád bych na tomto místě poděkoval svému vedoucímu Ing. Tomáši Pavelkovi za vedení, odbornou pomoc, cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Janu Škodovi Ph.D. za odbornou pomoc při vytváření měřicího přípravku v laboratoři světelné techniky.

Jako autor uvedené bakalářské 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Vliv teploty na světelně-technické parametry LED

Pavel Sláma

vedoucí: Ing. Tomáš Pavelka

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2015

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor Thesis

Influence of temperature on light- technical parameters of LED

by

Pavel Sláma

**Supervisor: Ing. Tomáš Pavelka
Brno University of Technology, 2015**

Brno

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá LED diodami a vlivem, jaký má na jejich parametry teplota.

V první části je rozebráno, na jakých principech fungují polovodiče a přechody, které tvoří základ pro pochopení mechanismů, na nichž fungují diody. Navazuje popis elektroluminiscence a základní popis fyzikálních principů, na kterých funguje.

Následující část má za úkol čtenáře zhruba seznámit s elektrotechnickými parametry a možnostmi napájení LED diod.

Dále následuje kapitola, která se zaměřuje na rozbor světelně technických parametrů. Jedná se především o výklad významu jednotlivých veličin a jejich vztah ke světelným diodám.

Následuje část o vlivu teploty na LED. V první řadě je zde vysvětleno, jak se které parametry mění s teplotou. Dále se zde nachází popis tepelného managementu a jeho vlivu na správnou funkčnost LED.

Poslední část obsahuje sestavení pracoviště pro měření vlivu tepelného působení na světelně-technické vlastnosti LED. Na tomto pracovišti poté následuje měření vybraných elektrických a světelných parametrů v závislosti na teplotě.

KLÍČOVÁ SLOVA: LED, elektroluminiscence, světelně-technické parametry, teplota přechodu, tepelný management, vliv teploty na LED, měření LED

ABSTRACT

This thesis deals with LEDs and how temperature influences their parameters.

In the first part it is analyzed how semiconductors and semiconductor junctions work, which is fundamental for understanding mechanisms of diodes. Next up is description of electroluminescence and basic description of physical principles, on which it works.

Following part is supposed to introduce reader to electro-technical parameters and powering possibilities of LEDs.

Following chapter focuses on description of lightning-technical parameters. It aims to describe their meaning and their relation to LEDs.

Next part is about influence of temperature. Firstly, it names the parameters which are altered by temperature change. Follows the description of thermal management and its influence on right behavior of LED diodes.

The last part contains construction of measuring workplace for analyzing temperature influence on lightning-technical parameters of LEDs. Measurement of chosen electrical and lightning parameters follows up.

KEY WORDS: LED, electroluminescence, light-technical parameters, junction temperature, thermal management, thermal influence on LEDs, LED measurement

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD	15
2 ROZBOR LED Z FYZIKÁLNÍHO HLEDISKA	16
2.1 POLOVODIČE OBECNĚ.....	16
2.1.1 VLASTNÍ POLOVODIČE	16
2.1.2 NEVLASTNÍ POLOVODIČE.....	17
2.1.3 PN PŘECHOD	18
2.2 PRINCIP FUNKCE POLOVODIČOVÝCH LED	19
2.2.1 ELEKTROLUMINISCENCE.....	19
2.2.2 FYZIKÁLNÍ PODSTATA LED	19
2.3 STRUKTURA LED DIODY	21
3 KONSTRUKCE LED DIODY	22
4 ROZBOR LED Z ELEKTROTECHNICKÉHO HLEDISKA	23
4.1 NAPÁJENÍ LED.....	24
4.1.1 ŘÍZENÍ JASU	24
4.2 LED PŘEDŘADNÍKY	24
5 ROZBOR LED ZE SVĚTELNĚ-TECHNICKÉHO HLEDISKA.....	24
5.1 SVĚTELNĚ TECHNICKÉ PARAMETRY	24
5.1.1 SVĚTELNÝ TOK	24
5.1.2 PROSTOROVÝ ÚHEL.....	25
5.1.3 JAS SVAZKU SVĚTELNÝCH PAPERKŮ.....	25
5.1.4 MĚRNÝ VÝKON	25
5.1.5 SVÍTIVOST	25
5.1.6 SPEKTRUM LED	26
5.1.7 KOLORIMETRICKÉ PARAMETRY	26
5.2 TVORBA BÍLÉHO SVĚTLA.....	27
5.2.1 RGB METODA	27
5.2.2 POUŽITÍ LUMINOFORU.....	28
6 VLIV TEPLoty NA PARAMETRY LED	29
6.1 ZMĚNA PARAMETRŮ S TEPLotOU	29
6.1.1 SVĚTELNÝ TOK	29
6.1.2 MĚRNÝ VÝKON	30
6.1.3 BAREVNÉ PODÁNÍ SVĚTLA	30
6.1.4 NAPĚTÍ	31
6.1.5 ŽIVOTNOST	32
6.2 TEPELNÝ MANAGEMENT.....	33
6.2.1 DRUHÝ PŘENOSU TEPLA	33

6.2.2	MOŽNOSTI KONSTRUKCE TEPELNÉ CESTY	34
6.2.3	TEPELNÝ ODPOR	35
7	MĚŘENÍ	36
7.1	ROZBOR MĚŘENÍ	36
7.2	POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE A POMŮCKY	40
7.3	MĚŘENÉ HODNOTY	41
7.3.1	VLIV TEPLoty PN PŘECHODU NA VELIKOST SVĚTELNÉHO TOKU LED.....	41
7.3.2	VLIV TEPLoty PN PŘECHODU NA MĚRNÝ VÝKON LED	42
7.3.3	ZÁVISLOST ZMĚNY VSTUPNÍHO NAPĚTÍ LED NA TEPLOTĚ PN PŘECHODU.....	43
7.3.4	KŘÍŽOVÁ CHARAKTERISTIKA.....	44
7.3.5	VLIV TEPLoty PN PŘECHODU NA KOLORIMETRICKÉ VLASTNOSTI LED	45
8	ZÁVĚR.....	47
	POUŽITÁ LITERATURA	49

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1</i>	<i>Pásové modely izolantu, vlastního polovodiče a kovu – převzato z [1]</i>	16
<i>Obrázek 2</i>	<i>Princip uvolnění elektronu z atomové vazby – převzato z [1]</i>	17
<i>Obrázek 3</i>	<i>Krystalická mřížka s elektronovou vodivostí – převzato z [3]</i>	17
<i>Obrázek 4</i>	<i>Krystalická mřížka s děrovou vodivostí – převzato z [3]</i>	18
<i>Obrázek 5</i>	<i>Provoz polovodičové diody – převzato z [2]</i>	18
<i>Obrázek 6</i>	<i>Princip fungování homogenního PN přechodu – přeloženo z [7]</i>	20
<i>Obrázek 7</i>	<i>Heteropřechod s připojeným napětím v propustném směru – převzato z [7]</i>	21
<i>Obrázek 8</i>	<i>Struktura LED diody – přeloženo z[6]</i>	22
<i>Obrázek 9</i>	<i>Nízkovýkonová LED – převzato z [18]</i>	23
<i>Obrázek 10</i>	<i>Vysokovýkonová LED – převzato z [19]</i>	23
<i>Obrázek 11</i>	<i>Schématická značka LED a její voltampérová charakteristika - převzato z [9]</i>	23
<i>Obrázek 12</i>	<i>Znázornění prostorového úhlu – převzato z [29]</i>	25
<i>Obrázek 13</i>	<i>Spektrum barevných LED - přeloženo z [25]</i>	26
<i>Obrázek 14</i>	<i>Znázornění teploty chromatičnosti - převzato z[8]</i>	27
<i>Obrázek 15</i>	<i>Diagram chromatičnosti - přeloženo z[20]</i>	27
<i>Obrázek 16</i>	<i>Tvorba bílého světla RGB metodou - převzato z [24]</i>	27
<i>Obrázek 17</i>	<i>Spektrum bílé LED - přeloženo z [26]</i>	28
<i>Obrázek 18</i>	<i>Tvorba bílého světla pomocí luminoforu - přeloženo z [24]</i>	28
<i>Obrázek 19</i>	<i>Závislost světelného toku na teplotě v porovnání s měrným výkonem - přeloženo z [31]</i>	29
<i>Obrázek 20</i>	<i>Změna světelného toku s teplotou – upraveno z [28]</i>	30
<i>Obrázek 21</i>	<i>Seoul Semiconductor - Posun barvy světla s teplotou v x-y souřadnicích - převzato z [27]</i>	30
<i>Obrázek 22</i>	<i>Osram - Závislost změny barevného podání na teplotě s oddělenými souřadnicemi – převzato z [28]</i>	30
<i>Obrázek 23</i>	<i>Posun spektra bílé LED s teplotou – přeloženo z [30]</i>	31
<i>Obrázek 24</i>	<i>Příklad změny napětí s teplotou - přeloženo z [13]</i>	31
<i>Obrázek 25</i>	<i>Seoul Semiconductors - Relativní změna napětí s teplotou - přeloženo z [27]</i>	31
<i>Obrázek 26</i>	<i>Degradace světelného toku při různých teplotách – převzato z [21]</i>	32
<i>Obrázek 27</i>	<i>Tepelný management - přeloženo z [10]</i>	33
<i>Obrázek 28</i>	<i>Odvod tepla přes vodivý rámeček - převzato z [10]</i>	34
<i>Obrázek 29</i>	<i>Odvádění tepla přes keramický substrát – převzato z [10]</i>	34
<i>Obrázek 30</i>	<i>Odvod tepla z diody vyjádřený pomocí tepelných odporů – upraveno z [11]</i>	35

<i>Obrázek 31 Chladič s Peltierovým článkem osazený LED</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 32 Ukázka prostředí Avasoft.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 33 Schématické znázornění měřicího pracoviště</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 34 Měřená LED (ilustrativní obrázek) – převzato z [32]</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 35 Schéma zapojení měřicího pracoviště.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 36 Pokles světelného toku s teplotou podle katalogu výrobce – převzato z [33]</i>	<i>42</i>

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Materiály pro výrobu jednotlivých barev LED – převzato z [3].....22

Tabulka 2 Soupis měřicích přístrojů a pomůcek.....40

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

LED	Light Emitting Diode (světlo emitující dioda)	
- q	Záporný náboj	(eV)
+ q	Kladný náboj	(eV)
Si	Křemík	
λ	Vlnová délka záření	(nm)
h	Planckova konstanta ($6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)	(J·s)
c	Rychlost světla ve vakuu ($2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)	(m·s ⁻¹)
E_g	Energie zakázaného pásu	(J)
I	Proud	(A)
U	Napětí	(V)
e	Náboj elektronu	(C)
D_n a D_p	Difuzní konstanty elektronů/děr	(m ² /s)
k	Bolzmannova konstanta	(J·K ⁻¹)
T	Termodynamická teplota	(K)
μ_n a μ_p	Hybnosti elektronů a děr	(m ² /s)
L_n a L_p	Difuzní délky elektronů/děr	(m)
τ_n a τ_p	Životní doby elektronů a děr	(s)
PWM	Pulse Width Modulation (Pulzně Šířková Modulace)	
Φ	Světelný tok	(lm)
Ω	Prostorový úhel	(sr)
L	Jas svazku světelných paprsků	(cd·m ⁻²)
M_z	Měrný výkon	(lm/W)
I	Svítivost	(cd)
P_e	Elektrický příkon	(W)
R_a	Index podání barev	
T_c	Teplota chromatičnosti	(K)
RGB	Trichromatická soustava Red, Green, Blue – červená, zelená, modrá	
UV	Ultra-Violet radiation – Ultrafialové záření	
LCD	Liquid Crystal Display - Displej z tekutých krystalů	
PCB	Printed Circuit Board – deska tištěných spojů	
MCPCB	Metal Core Printed Circuit Board – deska tištěných spojů s kovovým jádrem	

T_v	Teplotně napěťový koeficient	(mV/°C)
t_j	Teplota na PN přechodu	(°C)
t_a	Teplota okolí	(°C)
R_θ	Tepelný odpor	(°C/W)
CRI	Color rendering index – index barevného podání	

1 ÚVOD

Těžko bychom si dnes představovali život bez umělých zdrojů světla. Setkáváme se s nimi prakticky na každém kroku a mnohdy jsou jimi naše kroky i vedeny. V době kdy byla možnost užití umělého osvětlení pračlověkem objevena, znamenala ochranu před predátory a prodloužení doby bdělosti a produktivity.

Umělému osvětlování je tedy přikládán velký význam. Lidstvo proto vykládalo velké úsilí, aby se od spalování tuhých paliv přesunulo k efektivnějším, kompaktnějším a bezpečnějším možnostem osvětlování. Dlouhou dobu se však nebylo možné opřít od spalování paliv, byť značně vylepšeného. Milníkem byla druhá polovina 19. století, kdy se začala rozšiřovat elektřina a s ní přišly ní řadu elektrické zdroje světla. Byly uvedeny žárovky, posléze výbojky a historicky nejmladší zdroje osvětlení, světlo-emitující diody.

LED ovšem z historického hlediska nejsou až tak mladé, už v polovině 20. století totiž existovaly barevné diody a bylo je možné i koupit. Ovšem skutečný boom v osvětlování zažily LED až na přelomu 20. a 21. století, kdy byly vynalezeny bílé LED s luminoforem.

Tyto zdroje světla mají totiž nezanedbatelné výhody oproti klasickým zdrojům. Jsou menší, mají vyšší měrný výkon než většina ostatních zdrojů, nevadí jim časté zapínání, mají dlouhou životnost a řadu dalších kladných vlastností.

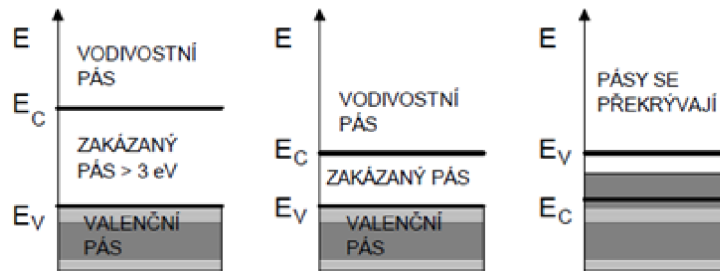
Ovšem i přes řadu nesporných výhod mají diody některá negativa. Tím hlavním bude zřejmě cena. Přes svůj vysoký měrný výkon nevydává většina samostatných LED velký světelný tok a je třeba jich použít více. Cenovou nevýhodu částečně smazává vysoká ekonomika provozu a životnost. Dalším podstatným negativem je závislost parametrů na teplotě. Tu je možno vyřešit kvalitním odvodem tepla, popřípadě chlazením, znamená to ovšem další finanční zátěž.

V dnešní době je však diodám věnováno velké množství pozornosti, jsou dále zdokonalovány a používány v řadě odvětví. Dá se tedy očekávat zlepšování všech provozních parametrů, se kterým musí jít ruku v ruce zkvalitňování tepelného managementu.

2 ROZBOR LED Z FYZIKÁLNÍHO HLEDISKA

2.1 Polovodiče obecně

Polovodiče jsou materiály, nacházející se na stupnici vodivosti mezi izolanty a vodiči. Je pro ně specifické, že mají záporný teplotní součinitel odporu. Jejich odpor tedy s teplotou klesá. Mezi nejpoužívanější polovodičové prvky patří křemík a germanium, křemík je však upřednostňován, protože se dá používat ve větším teplotním rozmezí (až do 150 °C, proti 75 °C u germania). Jiné prvky se používají především ve specifických aplikacích [1].



Obrázek 1 Pásové modely izolantu, vlastního polovodiče a kovu – převzato z [1]

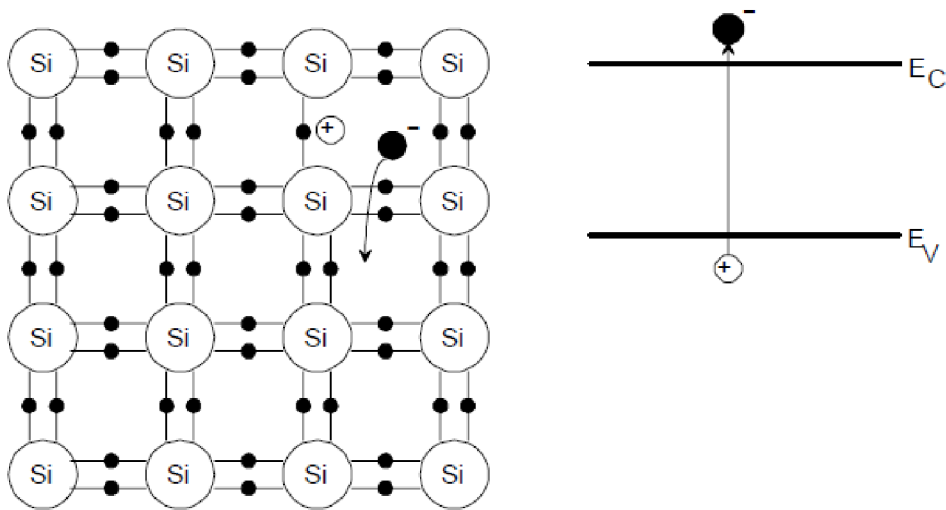
U polovodičů se vodivost může rozdělit na dva druhy - tzv. vlastní a nevlastní.

2.1.1 Vlastní polovodiče

Vlastní polovodič by měl být ideálně tvořen dokonalým krystalem bez poruch v krystalické mřížce a bez příměsí. V praxi se k výrobě součástek používá především křemík, a to s čistotou minimálně 99,9999 %. Polovodiče jsou materiál, u kterého se výrazně mění vlastnosti podle teploty. Za nízkých teplot se vlastní polovodič chová jako izolant. Vodivostní pás je tedy prázdný a v materiálu se nenachází žádné volné nosiče náboje. Pokud ovšem polovodič zahřejeme, nebo mu dodáme energii jiným vlivem, můžeme tím dodat valenčnímu elektronu dostatečnou energii k přeskočení do vodivostního pásu. Tento jev nazýváme ionizací, potřebnou energii pak ionizační energií. Elektron tedy opustí kovalentní vazbu a bude se pohybovat prostorem krystalické mřížky. Po uvolnění elektronu o náboji $-q$ zůstane ve valenčním pásmu atomu tzv. díra. Ta má stejně velký náboj jako uvolněný elektron, avšak s opačným znaménkem, tedy $+q$. Tato díra může zaniknout, pokud její místo zaplní jiný elektron. Stejně tak z ní uvolněný elektron zaujme místo v jiné díře. Tento jev se nazývá rekombinací, což je základní princip přenosu náboje v polovodiči [1-3].

Pokud na polovodič připojíme elektrické napětí, díry se začnou pohybovat od kladného pólu směrem k zápornému a elektrony opačně.

Na obrázku 2 můžeme vidět vznik volného elektronu a díry. Elektronu byla dodána dostatečná energie pro uvolnění z valenční vrstvy a za přítomnosti elektrického pole se může podílet na vedení proudu.



Obrázek 2 Princip uvolnění elektronu z atomové vazby – převzato z [1]

2.1.2 Nevlastní polovodiče

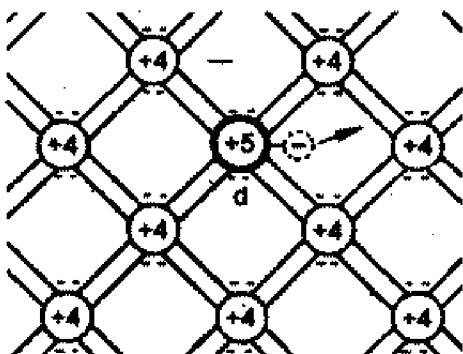
Nevlastní polovodiče se liší od vlastních tím, že se nejedná o dokonalý krystal, ale obsahuje příměsi. I velmi malé množství příměsí (řádově tisícina procenta) dokáže výrazně zvýšit vodivost.

„Jediný atom trojvazného bóru na 100 000 atomů křemíku zvětší tisíckrát vodivost.“ [2]

Přidávání příměsí v podobě atomů do čistého polovodiče se nazývá dotování. Pokud například dotujeme krystal křemíku atomy hliníku s třemi valenčními elektrony, je hlavním nosičem náboje elektron. Jestliže dotujeme krystal křemíku prvkem s pěti valenčními elektrony, např. fosforem, stanou se většinovým nosičem náboje díry [2].

2.1.2.1 Nevlastní polovodič typu N

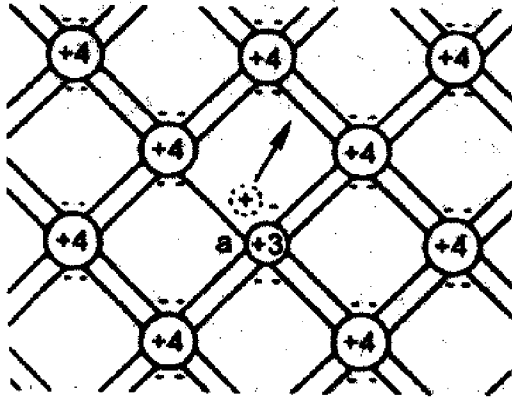
Jestliže tedy provedeme dotaci např. čtyřmocného prvku, jako je křemík, prvkem s pěti valenčními elektrony, stane se pátý elektron nadbytečným a je k atomu vázán jenom slabě. To znamená, že po dodání i velmi malé energie se uvolní, což má za následek tzv. elektronovou vodivost. V praxi stačí k dodání potřebné energie pro ionizaci umístění materiálu do prostředí o pokojové teplotě. Už za těchto podmínek dojde k ionizaci materiálu a uvolnění elektronů. Po jejich uvolnění se atom pětímocného prvku stává kladně nabitým iontem, který je pevně zasazen v krystalické mřížce. Protože takový atom přidává jeden elektron navíc do materiálu, nazývá se **Donorem**. V polovodiči typu N jsou majoritními (většinovými) nosiči náboje elektrony, minoritními (menšinovými) zase díry [1, 3].



Obrázek 3 Krystalická mřížka s elektronovou vodivostí – převzato z [3]

2.1.2.2 Nevlastní polovodič typu P

Pokud je do krystalické mřížky čtyřmocného prvku přidán atom třímocného prvku, není vytvořena dokonalá kovalentní vazba. Protože jeden elektron chybí, vznikne na jeho místě díra. Takové příměsi nazýváme **Akceptory**. Vodivost, která je jimi dána materiálu se nazývá děrová. Princip fungování je potom podobný jako u elektronové vodivosti. Už při malém množství dodané energie je materiál ionizován a vzniklé díry mohou přijímat elektrony. Díry samotné se tedy nehýbou. Musí vždy akceptovat elektron, který zase vytvoří díru jinde. V polovodiči typu P jsou majoritními nosiči díry, minoritními elektrony [3]



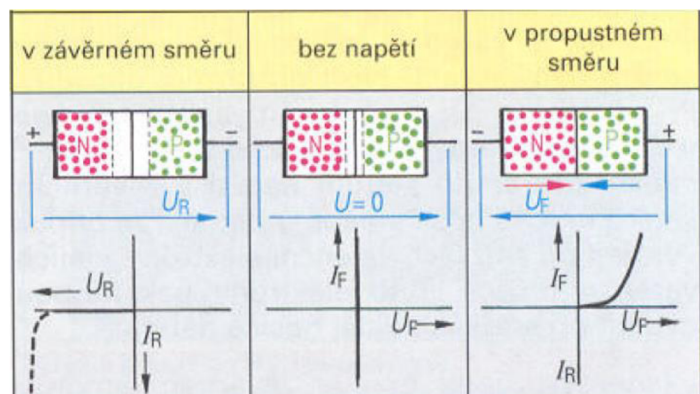
Obrázek 4 Krystalická mřížka s děrovou vodivostí – převzato z [3]

2.1.3 PN přechod

Většina polovodičových součástek je tvořena více než jedním druhem polovodiče. Důležitým prvkem polovodičových součástek jsou tedy polovodičové přechody. Ty mohou zahrnovat přechody mezi různými typy polovodičů, mezi polovodičem a jiným materiálem, či mezi polovodiči s různou mírou dotace příměsí. U PN přechodů se jedná o dva stejnorodé materiály, přičemž jeden má vodivost děrovou a druhý elektronovou. Tyto materiály se mohou spojit např. difuzní technologií.

Na hranici takového PN přechodu se i bez napětí vlivem okolní teploty pohybují nosiče náboje. Elektrony z polovodiče typu N se pohybují do polovodiče typu P, kde se rekombinují. Totéž dělají díry z polovodiče P po přemístění do polovodiče N. V důsledku toho vzniká kladný prostorový náboj na straně polovodiče N, odpuzující volné díry z polovodiče P. Záporný náboj z polovodiče P pak odpuzuje elektrony z polovodiče N.

Nosiče náboje, které jsou na svých stranách minoritní, pak vytvoří kolem přechodu vrstvu, která brání další difuzi. Mezi vrstvami obou stran tedy vznikne vyprázdňená oblast, mezi jejíž náboji na obou stranách se objeví rozdíl potenciálů. Ten tvoří difuzní napětí, které tvoří práh pro otevření přechodu v propustném směru [2].



Obrázek 5 Provoz polovodičové diody – převzato z [2]

2.2 Princip funkce polovodičových LED

2.2.1 Elektroluminiscence

LED diody obecně fungují na principu elektroluminiscence. To znamená, že se vhodný elektroluminiscenční materiál vloží do elektrického pole. Elektrické pole vybudí nosiče náboje, které svou energii posléze odevzdají pomocí záření.

2.2.2 Fyzikální podstata LED

Princip činnosti LED diody je založen na zářivé rekombinaci elektronu s dírou. Pokud připojíme napětí na PN přechod v propustném směru, majoritní nosiče se stanou schopnými překonat zakázané pásmo a dostávají se do polovodiče opačné vodivosti, kde se stávají minoritními. Díky tomu vzniká nerovnovážený stav a nastává rekombinace elektronů s děrami, v důsledku které se energie elektronů procházejících přes zakázaný pás (zvaný v tomto případě též aktivní zóna) mění na energii záření. Na šířce zakázaného pásu je potom závislá vlnová délka vydávaného záření λ [5, 6]:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_g} \quad (2.1)$$

h - Planckova konstanta ($6,6260755 \cdot 10^{-34}$ J·s)

c - Rychlost světla ve vakuu ($2,99792458 \cdot 10^8$ m·s⁻¹)

E_g - Energie zakázaného pásu (J) [7]

V případě ideální LED diody by každý elektron injektovaný do aktivní zóny vytvořil foton. Aby byl zachován zákon zachování energie, musí se energie vložená elektronu rovnat energii fotonu.

Vyjádřeno rovnicí:

$$e \cdot U = h \cdot c \quad (2.2)$$

U – Přiložené napětí (V)

e – Náboj elektronu (C)

h – Planckova konstanta ($6,6260755 \cdot 10^{-34}$ J·s)

c - Rychlost světla ve vakuu ($2,99792458 \cdot 10^8$ m·s⁻¹) [7]

V praxi tato rovnice neplatí, protože v LED diodách se neodehrává pouze rekombinace vytvářející fotony, tzv. zářivá, ale i rekombinace nezářivá.

V homogenních přechodech PN závisí distribuce volných nosičů na jejich difuzní konstantě. Ta se však nedá žádným snadným způsobem změřit. Běžnější je proto pomocí Hallova jevu změřit hybnost nosičů, ze které se již posléze dá pomocí Einsteinových vztahů spočítat difuzní konstanta:

$$D_n = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \mu_n \quad (2.3)$$

$$D_p = \frac{k \cdot T}{e} \cdot \mu_p \quad (2.4)$$

D_n a D_p jsou difuzní konstanty elektronů/děr (m^2/s)

k – Boltzmannova konstanta ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$)

T – Termodynamická teplota (K)

μ_n a μ_p – Hybnosti elektronů a děr (m^2/s) [7]

Vzdálenost, kterou urazí minoritní nosič před tím, než rekombinuje, se nazývá difuzní délka.

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \quad (2.5)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} \quad (2.6)$$

L_n a L_p – Difuzní délky elektronů/děr (m)

D_n a D_p – Difuzní konstanty elektronů/děr (m^2/s)

τ_n a τ_p – Životní doby elektronů a děr (s) [7]

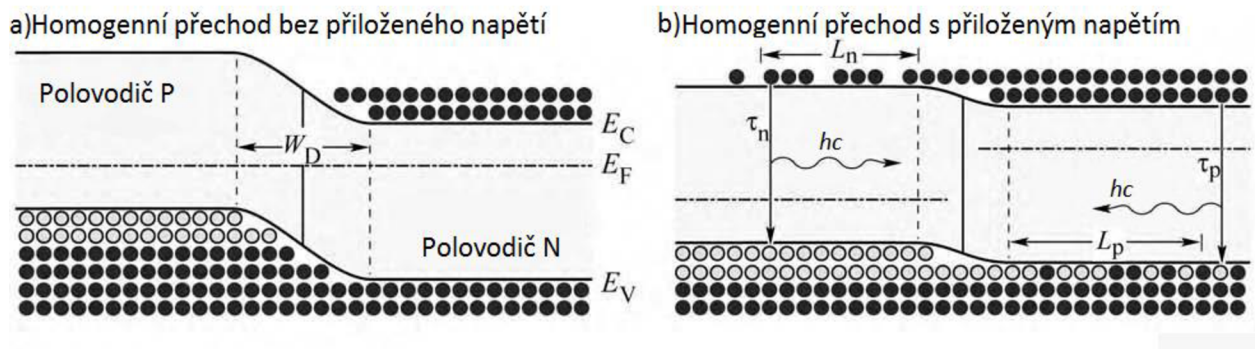
Princip homogenního přechodu dokresluje obrázek 6. Na něm můžeme vidět jeho energetický pásový diagram v propustném stavu. V části a) jde vidět stav bez přiloženého napětí. Je patrné, že nosiče náboje nemají dostatečnou energii pro přesun do vyšší energetické hladiny a proto se nekoná emise fotonů. V části b) je již přiloženo dostatečné napětí a probíhá difuze nosičů. Je vidět generování fotonů včetně názorné ukázky výše zmíněných parametrů.

Energetické hladiny znamenají: E_C - Vodivostní pásmo

E_F – Fermiho hladina

E_V – Valenční pásmo

E_D – Energie zakázané oblasti



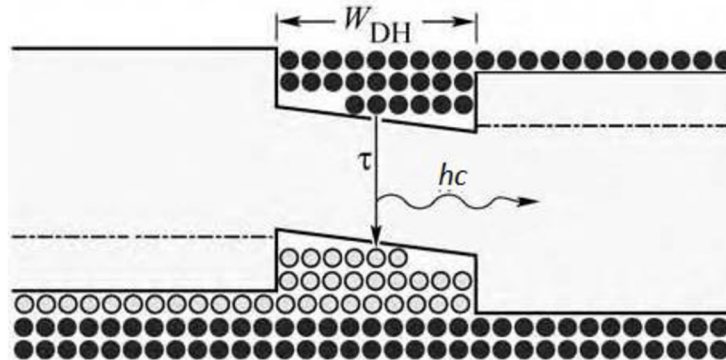
Obrázek 6 Princip fungování homogenního PN přechodu – přeloženo z [7]

Homogenní přechod je z historického hlediska starším typem přechodu. Vznikne, pokud vytvoříme přechod uvnitř stejnorodého materiálu. PN přechod se v takovém materiálu vytváří dotací příměsemi. Takto vytvořené diody jsou levné a jednoduché na výrobu. Potýkají se ovšem

s velkým podílem nezářivých rekombinací, které snižují výkon diody a způsobují ohřívání přechodu.

„Žádné vysokovýkonové LED nepoužívají homogenní přechod. Místo nich se nasazují heterogenní přechody, které mají proti homogenním přechodům významné výhody“ (přeloženo z [7])

Proto byly vynalezeny heterogenní přechody. Ty jsou tvořeny dvěma druhy materiálu a vykazují podstatně lepší vlastnosti, alespoň co se výkonu týče. Jinak jsou diody s heterogenními přechody dražší a složitější na výrobu.



Obrázek 7 Heteropřechod s připojeným napětím v propustném směru – převzato z [7]

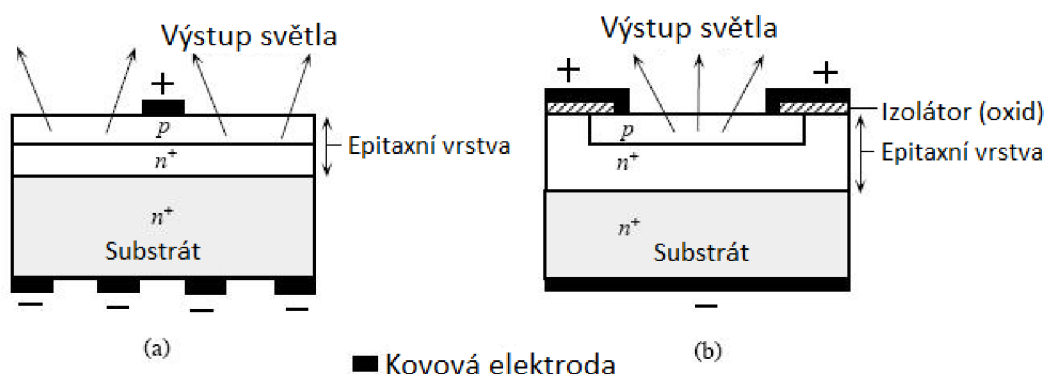
U výkonových aplikací se tedy používají zpravidla heterogenní přechody. Tyto přechody mají v části P a v části N rozdílnou šířku zakázaného pásu. Dnešní LED mají většinou heterogenních přechodů několik [7].

2.3 Struktura LED diody

Struktura diody hraje důležitou roli při vyzařování světla z povrchu. Proto jsou zpravidla konstruovány, aby se hlavní část rekombinací odehrála při povrchu diody. To lze zajistit následujícími způsoby:

- Zvýšit dotaci substrátu, což přidá dodatečné minoritní nosiče. Ty se přesunou k vrcholu, rekombinují a generují na povrchu záření.
- Zvětšením difuzní délky. Ta ovšem nesmí překročit kritickou délku, protože by nastávala zpětná absorpce fotonů do diody.

Diody jsou většinou navrhovány se substrátem typu N, na němž je umístěna vrstva typu P. K té je poté připevněna elektroda.



Obrázek 8 Struktura LED diody – přeloženo z[6]

Na obrázku 8 vidíme schématickou ilustraci LED diody.

V případě (a) se vrstva p nechá epitaxně vyrůst na substrátu n^+ . V případě (b) se nechá epitaxně vyrůst vrstva n^+ , ve které se posléze vytvoří oblast p pomocí difuze [6].

Tabulka 1 Materiály pro výrobu jednotlivých barev LED – převzato z [3]

	Barva	Vlnová délka	Polovodičový materiál	Úbytek napětí
	Infračervená	$> 760 \text{ nm}$	GaAs; $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})$	1,6 V
	Červená	$610 < \lambda < 760$	$\text{AlGaAs}; \text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}; (\text{GaP})$	1,8 - 2,1 V
	Oranžová	$590 < \lambda < 610$	$\text{Ga}_x\text{As}_{1-x}\text{P}; (\text{Al}, \text{Ga}, \text{In})\text{P}; \text{GaP}$	2,2 V
	Žlutá	$570 < \lambda < 590$	$\text{GaAsP}; \text{AlGaInP}; \text{GaP}$	2,4 V
	Zelená	$500 < \lambda < 570$	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}; \text{GaN}; \text{GaP}; (\text{Al}, \text{Ga}, \text{In})\text{P}$	2,6 V
	Modrá	$450 < \lambda < 500$	$\text{ZnSe}; \text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}; \text{SiC}$	3,0 - 3,5 V
	Fialová	$400 < \lambda < 450$	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$	3,0 - 3,5 V
	Ultrafialová	$\lambda < 400 \text{ nm}$	diamant (235 nm); BN (215 nm); $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}; \text{AlN}$ (210 nm)	3,5 V

3 KONSTRUKCE LED DIODY

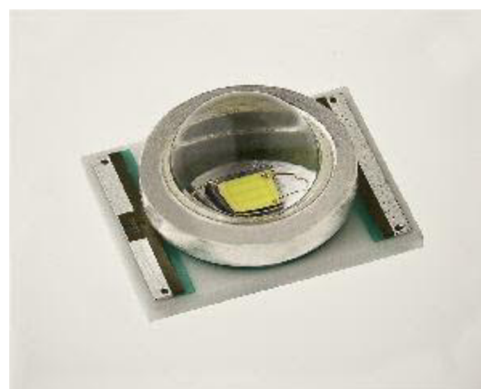
Všechny diody jsou tvořeny dvěma elektrickými kontakty, průhledným povrchem nebo čočkou pro vývod světla a v případě výkonových diod teplovodivou cestou pro odvod tepla.

Okénko pro průchod světla by mělo splňovat následující podmínky:

- Vysoká optická průhlednost prostředí
- Vysoký index lomu
- Velká chemická odolnost
- Teplotní stabilita



Obrázek 9 Nízkovýkonová LED – převzato z [18]



Obrázek 10 Vysokovýkonová LED – převzato z [19]

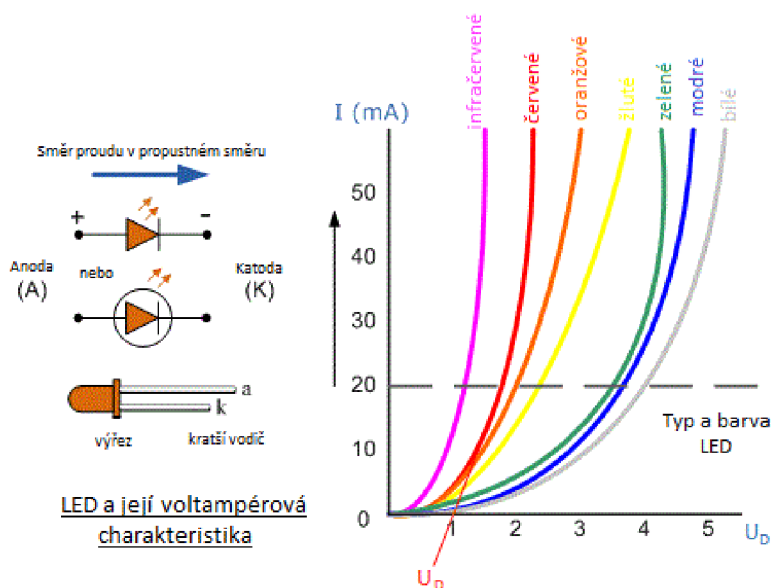
U „klasické“ nízkovýkonové diody je LED čip spojen se dnem dříčku s vysoce odrazivým povrchem. Toto místo propojení tvoří katodový kontakt, zatímco anodový je připojen k vrchní části čipu. Obal těchto diod mívá obvykle tvaru polokoule a je vyroben z epoxidových materiálů.

Výkonové diody bývají obvykle připojeny na desce plošných spojů, kde jsou vyvedeny kontakty pro připojení k napájení a dále se zde nachází jeden nebo více kontaktů pro odvádění tepla [7].

4 ROZBOR LED Z ELEKTROTECHNICKÉHO HLEDISKA

Světelné zdroje LED obecně vyžadují napájení stejnosměrným proudem. U výkonových LED jde přitom o proud v řádu stovek miliampér (typicky 350 mA). Napětí na diodách se pohybuje řádově v jednotkách voltů.

U LED diod uvažujeme pouze 1. kvadrant voltampérové charakteristiky, v závěrném směru se kvůli nízkým maximálním závěrným proudům nepoužívá.



Obrázek 11 Schématická značka LED a její voltampérová charakteristika - převzato z [9]

4.1 Napájení LED

LED dioda má voltampérovou charakteristiku podobnou obyčejné diodě v propustném směru. To znamená, že i malý nárůst napětí zvýší výrazně proud. Pokud se tedy pro napájení použije zdroj konstantního napětí, je třeba přidat do série odpor. Ten by měl mít úbytek napětí alespoň 20 % napětí diody. Toto řešení však znamená vytvoření ztráty výkonu, který se na odporu zmaří. Proto se u výkonových LED používá zpravidla napájení zdrojem konstantního proudu [21].

4.1.1 Řízení jasu

Významnou výhodou LED diod je možnost regulovat jejich jas velmi snadným způsobem. Používá se k tomu takzvaná modulace PWM (Pulse Width Modulation, neboli pulzně šířková modulace). To znamená, že se dioda velice rychle zapíná a vypíná a střída PWM modulace určuje, jakou dobu z periody je dioda zapnutá. Pokud je tedy střída 75 %, dioda je zapnutá po tři čtvrtiny periody. Výsledný jas je potom přibližně lineární funkcí časově závislé střední hodnoty proudu [16].

4.2 LED Předřadníky

Pro napájení výkonových LED konstantním proudem je nezbytné použít tzv. LED předřadník neboli driver. To znamená elektronický obvod, který zaručí požadované parametry elektrického proudu. Předřadníky mohou obsahovat buď pouze měnič, nebo mohou obsahovat i usměrňovač, aby se daly připojit přímo do sítě.

Měniče v předřadnících mohou být obecně následujícího typu:

- Měniče snižující napětí (Step-Down)
- Měniče zvyšující napětí (Step-Up)
- Měnič zvyšující i snižující napětí (Buck-Boost)
- Měnič typu SEPIC

Předřadníky mají většinou pevně nastavený proud, proto je nezbytné správně vybrat diody. Proudová hodnota předřadníku nesmí být vyšší než proud diody. Napěťová hodnota předřadníku by naopak měla být o něco vyšší [21].

5 ROZBOR LED ZE SVĚTELNĚ-TECHNICKÉHO HLEDISKA

5.1 Světelné technické parametry

5.1.1 Světelný tok

Tato veličina je označením pro energii, vyzářenou zdrojem světla za dobu 1 sekundy. Jde tedy o světelnou analogii výkonu. Energie světelného toku má pak schopnost způsobit zrakový vjem.

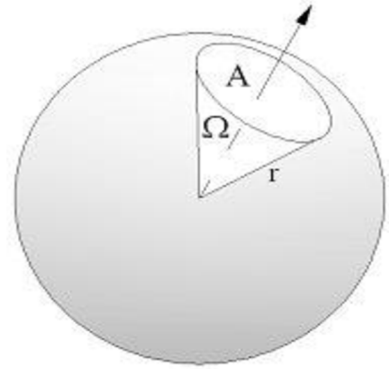
Značkou světelného toku je Φ a jeho jednotkou je 1 lm (Lumen) [4].

5.1.2 Prostorový úhel

Prostorový úhel je roven ploše, kterou vytne kuželosečka na povrchu koule mající společný střed s vrcholem uvažované kuželové plochy.

Prostorový úhel o velikosti 1 steradián je definovaný jako kužel, jenž na kouli o poloměru 1 m vytvoří plochu 1 m².

Značí se Ω , jeho jednotkou je sr (steradián) [4].



Obrázek 12 Znárodnění prostorového úhlu – převzato z [29]

5.1.3 Jas svazku světelných paprsků

Jas je veličina, na niž přímo reaguje zrakový orgán. Je to množství světelného toku, jež emituje určitá plocha do určitého prostorového úhlu.

Značkou jasu je L a jeho jednotka je $cd \cdot m^{-2}$ (kandela na metr čtvereční) [4].

5.1.4 Měrný výkon

Jde o parametr světelných zdrojů, který vyjadřuje účinnost přeměny elektřiny na světlo. Lze říct, že čím vyšší je měrný výkon, tím je vyšší efektivita přeměny elektrické energie na tu světelnou [4].

$$M_Z = \frac{\Phi}{P_e} \quad (5.1)$$

M_Z – Měrný výkon (lm/W)

Φ – Světelný tok (lm)

P_e – Elektrický příkon (W)

Měrný výkon světelných zdrojů se může pohybovat od desítek až po stovky. Například obyčejné žárovky mívají asi 13 lm/W, zatímco nejlepší komerční LED dnešní doby mají kolem 150 lm/W (pozn. Je myšlen skutečný měrný výkon, ne laboratorní v ideálních podmínkách) [26].

5.1.5 Svítivost

Světelné zdroje nedokáží vyzařovat světelný tok do prostoru rovnoměrně. Proto se u nich zjišťuje svítivost, což znamená hustotu světelného toku v různých směrech.

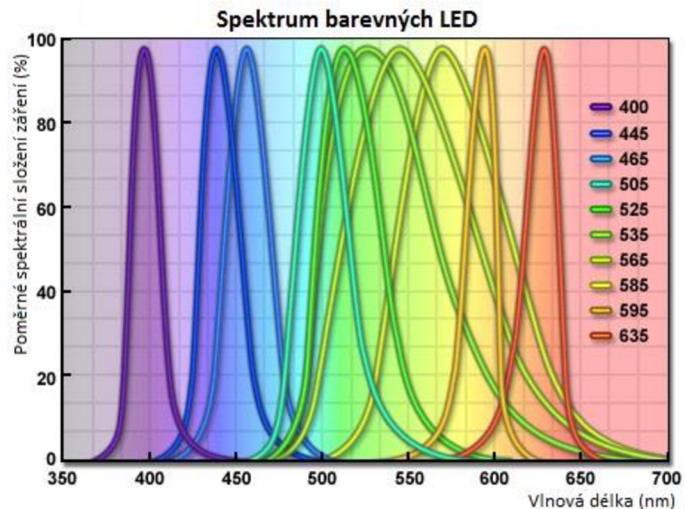
Svítivost je definovaná jako prostorová hustota světelného toku, jenž je rovna prostorovému toku obsaženému v jednom prostorovém úhlu.

Například klasická žárovka 100 W má svítivost zhruba 200 cd. LED zdroje světla mají při stejné svítivosti 8x menší příkon.

Svítivost se značí I a její jednotka je 1 cd (Kandela) [4].

5.1.6 Spektrum LED

Spektrum světla nám ukazuje, z jakých vlnových délek se skládá zkoumané záření. Tento způsob popisu složení světla se velmi hodí pro naznačení světla, které vydávají LED diody. Protože standardní LED (bez vrstvy luminoforu) je schopna vyprodukovat pouze monochromatické záření, vidíme na obrázku 13 tenké křivky jednotlivých vlnových délek pro různé barvy LED. Pro porovnání, na obrázku 17 vidíme spektrum bílého světla LED.



Obrázek 13 Spektrum barevných LED - přeloženo z [25]

5.1.7 Kolorimetrické parametry

○ Index podání barev

Jelikož jsou světelné zdroje, resp. svítidla nejčastěji používány k osvětlování lidmi využívaných prostor, je důležité, aby ve světle použitého zdroje vypadaly barvy přirozeně. Význam této veličiny spočívá především v zavedení novějších zdrojů světla, jako například výbojky či LED, které mají značně jiné spektrum v porovnání s dříve používanými žárovkami (pozn. žárovka má podobné spektrum jako denní světlo).

Index podání barev tedy vyjadřuje stupeň shodnosti vjemu barvy objektů, osvětlených uvažovaným zdrojem v porovnání s referenčním zdrojem světla.

Značí se R_a a nabývá hodnot 0-100. Při teplotě chromatičnosti do 5000 K odpovídá R_a 100 černému zářiči, nad 5000 K odpovídá smluvnímu světlu D. R_a 0 je nejhorší barevné podání odpovídající monochromatickému záření. V obytných interiérech je v zásadě požadováno $R_a > 80$ (ČSN EN 12464) [4].

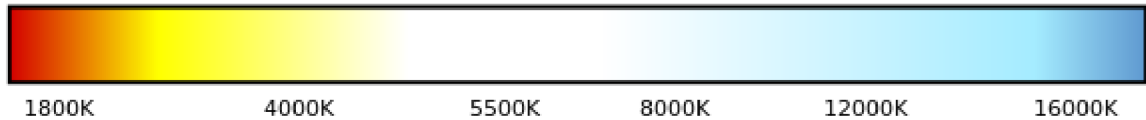
○ Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti je jedním z možných způsobů, kterým lze popsat barevné vlastnosti světla. Jde o teplotu teplotního zářiče, při níž vydává záření o stejné chromatičnosti, jako zkoumané záření. Při přechodu do hladiny teploty chromatičnosti, přesahující rozsah teplotního zářiče (5000 K) se používá **náhradní teplota chromatičnosti**. Ta se neporovnává s černým zářičem, ale se smluvním světlem D. To je normalizované záření se spektrem odpovídajícím dennímu světlu.

Značí se T_C a její jednotkou je K (Kelvin) [4].

Ve snaze o přiblížení se barvou klasickým tepelným zdrojům světla vytvořili výrobci LED následující kategorie teploty chromatičnosti:

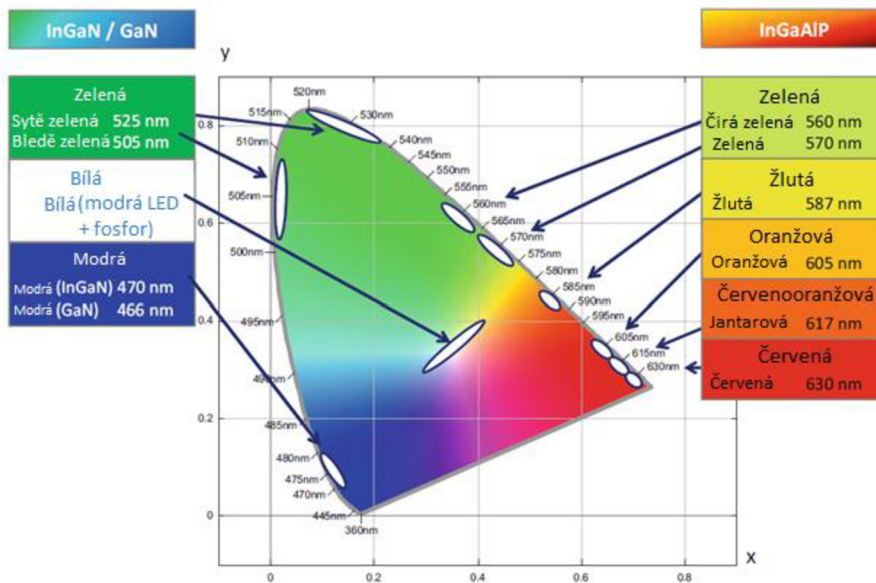
- Teplá bílá 2600 – 3700 K
- Neutrální bílá 3700 – 5000 K
- Studená bílá 5000 – 8300 K [14]



Obrázek 14 Znárodnění teploty chromatičnosti - převzato z[8]

○ Trichromatické soustavy

Principem trichromatické soustavy je definice libovolného barevného podnětu na základě směsi tří vhodně zvolených parametrů. Mohou sem patřit soustavy rozdělené na složky XYZ, nebo například RGB (Red = červená, Green = zelená, Blue = modrá). Tyto soustavy lze po přepočtu vykreslit do diagramů. Na obrázku 15 lze vidět takový diagram v souřadnicích x, y [4].



Obrázek 15 Diagram chromatičnosti - přeloženo z[20]

5.2 Tvorba bílého světla

Existují dvě konvenční metody, jimiž lze vytvořit bílé světlo. Protože není možné vytvořit LED, u níž by vznikalo bílé světlo již při výstupu z přechodu, použije se buď RGB metoda, nebo luminoforová metoda [24].

5.2.1 RGB metoda

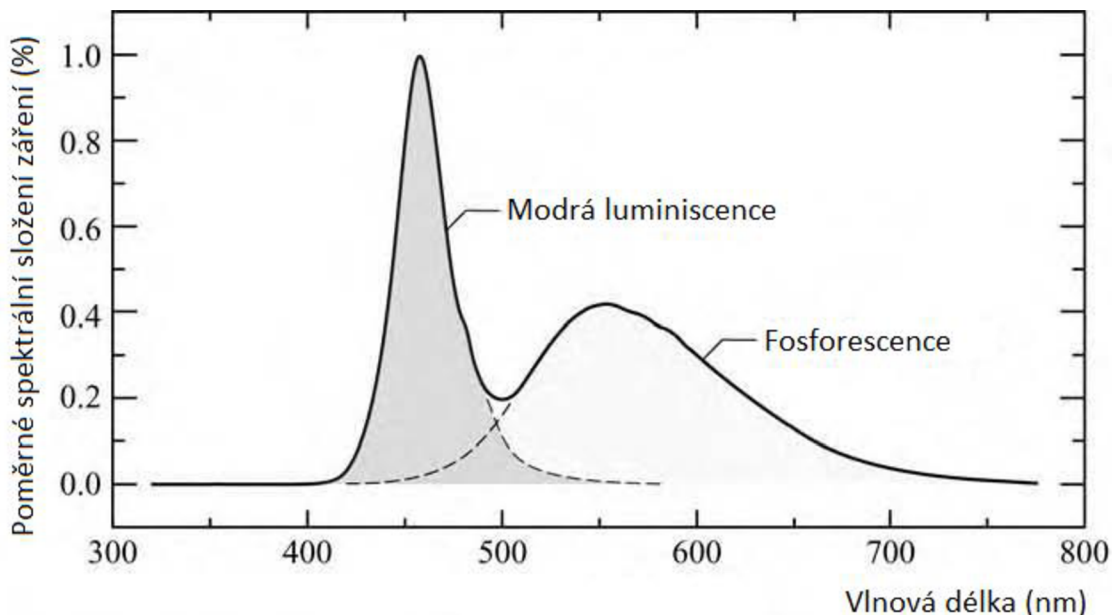
Tato metoda využívá tři samostatné LED diody emitující barvy červenou, zelenou a modrou. Tyto barvy se smíchají a ve výsledku tvoří bílé světlo. Jde o starší metodu, která je značně nedokonalá. Jednak, jak již zmíněno vyžaduje použití tří LED. Dále její barva není příliš stálá, protože každá z použitých barevných diod se při změně teploty chová jinak a především červená LED se s teplotou mění výrazně, což má za následek sklony diody měnit do modra. Navíc toto řešení nepřináší vysoký měrný výkon [24].



Obrázek 16 Tvorba bílého světla RGB metodou - převzato z [24]

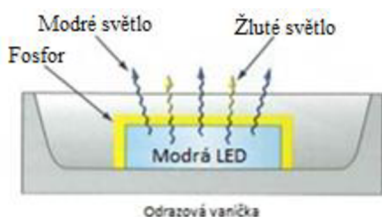
5.2.2 Použití luminoforu

Metoda tvorby bílého světla použitím luminoforu spočívá v kombinaci krátkovlnné LED, jako je modrá nebo ultrafialová s pláštěm z luminoforu. Modré nebo UV záření buď projde vrstvou luminoforu beze změny, nebo je v ní přeměněno na žluté. Kombinace žlutého záření s modrým tvoří bílé světlo [24].



Obrázek 17 Spektrum bílé LED - přeloženo z [26]

Metoda používající luminofor vytváří dokonalejší bílé světlo než RGB a navíc je bez nutnosti použití více LED efektivnější. Jde o metodu používanou již téměř výhradně. Existují však speciální případy, ve kterých se RGB řešení používá. Může jít o podsvícení LCD (Liquid Crystal Display = Displej z tekutých krystalů), popřípadě aplikace, kde je požadována možnost libovolně měnit barvu světla, např. náladové osvětlení [24].



Obrázek 18 Tvorba bílého světla pomocí luminoforu - přeloženo z [24]

6 VLIV TEPLoty NA PARAMETRY LED

LED diody jsou nazývány zdrojem studeného světla. To ovšem bohužel neznamena, že teplo nemá vliv na jejich parametry, nebo že by snad byly při svícení úplně studené. Navíc v důsledku používání stále výkonnějších diod nelze jejich chlazení nechat na samotném pouzdře jako u těch nízkovýkonových [17].

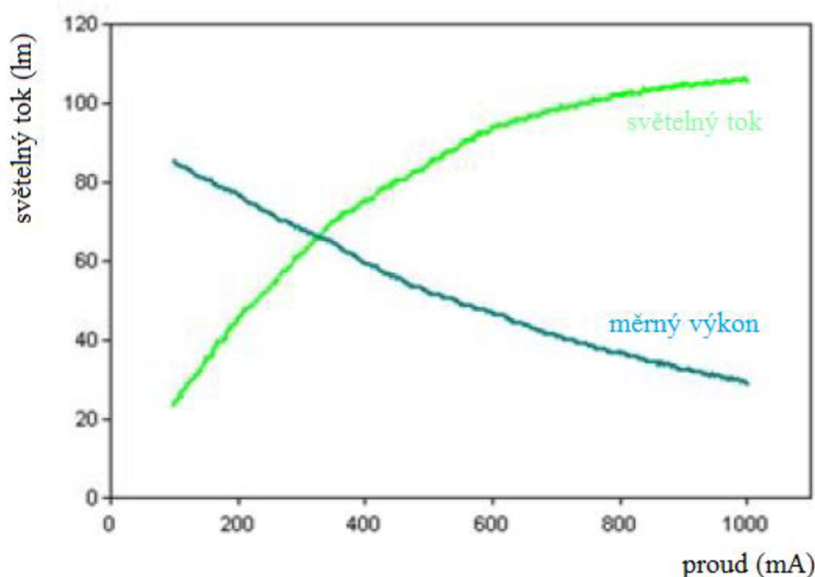
Teplo může mít na LED diody dopad dvojího rázu.

Může se jednat o vratné změny, jako výkon, barevné podání, napětí, nebo nevratné jako životnost. Pokud je ovšem teplota překročena příliš, mohou se změny při nižších teplotách vratné stát permanentními, nebo může dojít i k úplné destrukci diody. Proto je třeba si dávat pozor na maximální přípustnou teplotu přechodu udanou výrobcem a nikdy ji nepřekročit. Tato teplota se obvykle pohybuje kolem 150 °C [17].

6.1 Změna parametrů s teplotou

6.1.1 Světelný tok

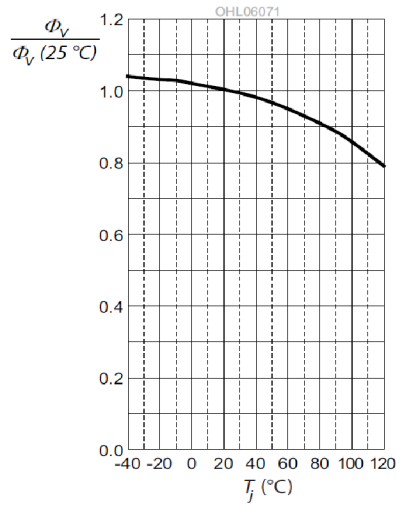
Protože je velikost světelného toku vystupujícího z LED diody závislá na vstupním proudu, jehož průchod diodu pochopitelně ohřívá, je nezbytné teplo z diody odvádět. Pokud totiž dojde k omezení vstupního proudu, dojde sice ke zvýšení účinnosti přeměny elektrické energie na světelnou, ale zároveň se sníží světelný tok. Jediným východiskem je tedy odvádění tepla.



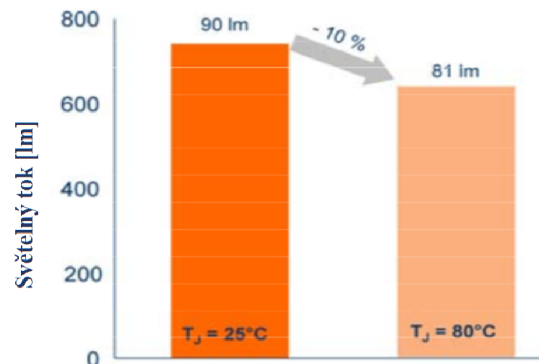
Obrázek 19 Závislost světelného toku na teplotě v porovnání s měrným výkonem - přeloženo z [31]

Výrobci měří světelný tok LED diod na 25 milisekund dlouhém pulzu při pevné teplotě přechodu 25 °C. Při běžném používání při pokojové teplotě je ovšem tato teplota 60 °C a výše. Bílé LED tedy v praxi poskytují minimálně o 10 % menší světelný tok než je udaný výrobcem [21].

Relativní světelný tok v závislosti na teplotě
 $\Phi_v/\Phi_v(25\text{ °C}) = f(T_j); I_F = 350\text{ mA}$



Procentuelní změna světelného toku



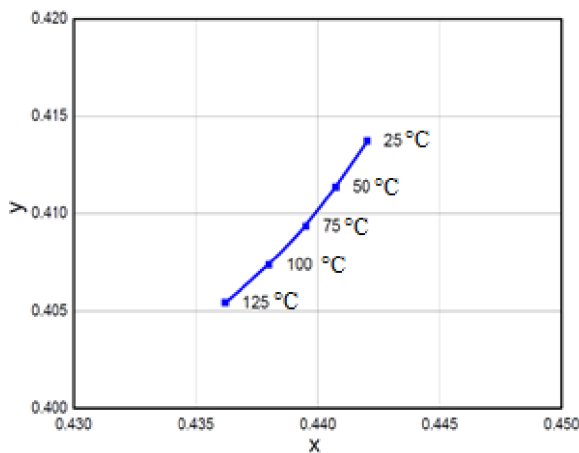
Obrázek 20 Změna světelného toku s teplotou – upraveno z [28]

6.1.2 Měrný výkon

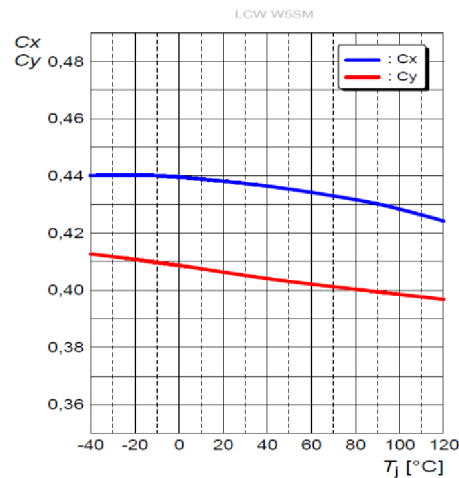
Zvyšování teploty má za následek redukci měrného výkonu. Pokud jde o krátkodobé zvýšení teploty, například při změně podmínek okolního prostředí, měrný výkon se po navrácení do původní teploty vrátí též na svou původní hodnotu. Pokud je ovšem v důsledku špatného tepelného managementu dioda vystavena vyšší než maximální provozní teplotě, dojde v ní k nevratným změnám a měrný výkon už se do své původní hodnoty nevrátí [10].

6.1.3 Barevné podání světla

Řada výrobců udává ve svých katalogích hodnotu teploty chromatičnosti pro teplotu přechodu 25 °C. To je ovšem hodnota, které lze v osvětlovací praxi jen těžko dosáhnout. Prakticky bývá teplota samozřejmě vyšší. Mnozí výrobci proto ve svých katalogových listech uvádí charakteristiku změny barvy s teplotou. Zároveň však každý výrobce udává tuto charakteristiku jinou formou [14].



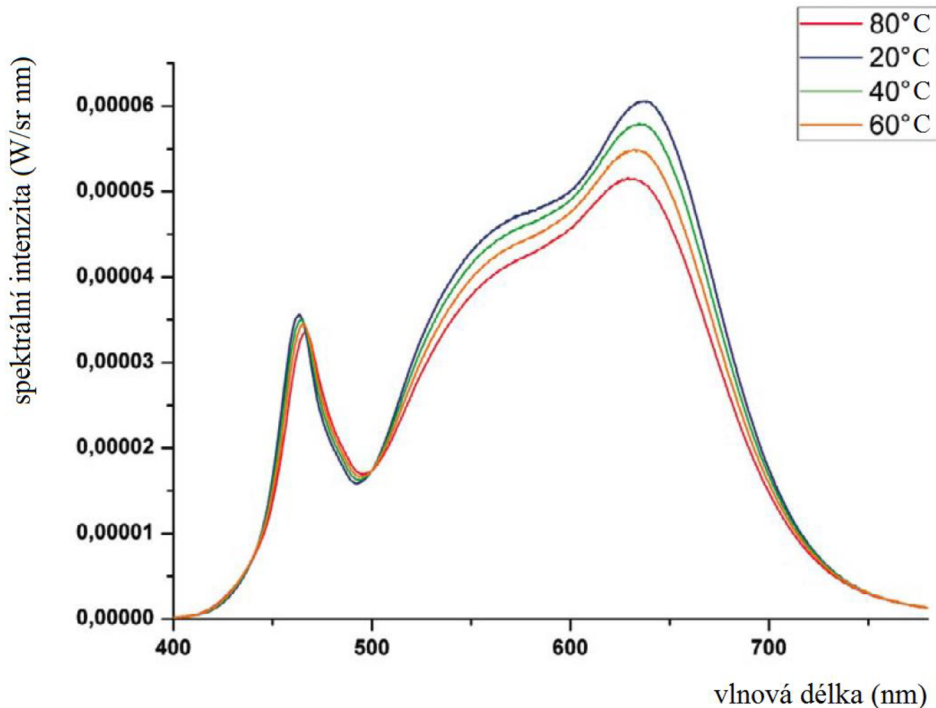
Obrázek 21 Seoul Semiconductor - Posun barvy světla s teplotou v x-y souřadnicích - převzato z [27]



Obrázek 22 Osram - Závislost změny barevného podání na teplotě s oddělenými souřadnicemi – převzato z [28]

Změna spektra

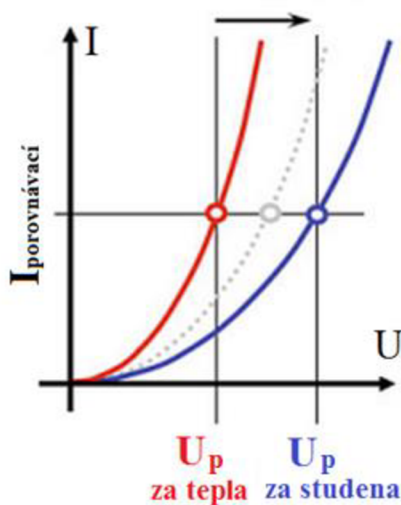
Změna spektra u LED diod je špatná především u těch bílých. Protože se používají i pro osvětlovací účely, znamená u nich i malý posun spektra viditelné změny v podání barev osvětlovaných objektů nebo prostor.



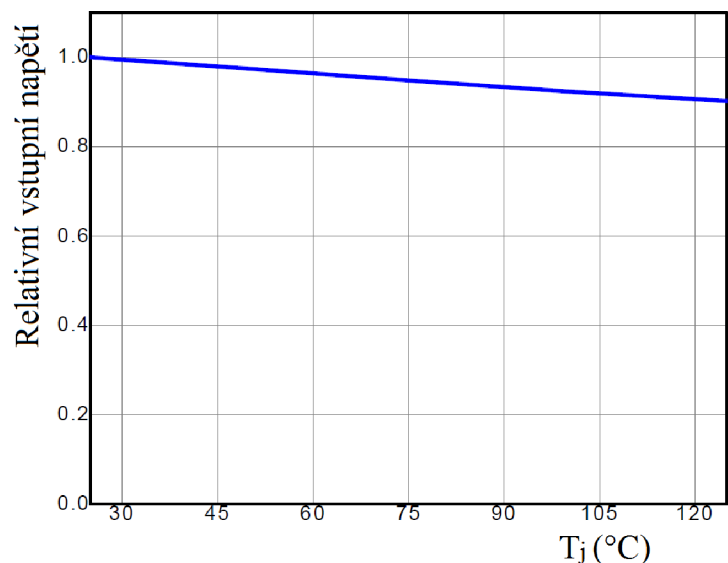
Obrázek 23 Posun spektra bílé LED s teplotou – přeloženo z [30]

6.1.4 Napětí

Při rostoucí teplotě napětí na diodě klesá. V tabulkách výrobce bývá uveden teplotně-napěťový koeficient. Bývá rozdílný především pro různé barevné diody. Jeho hodnota se pohybuje mezi -1 až -4 mV/°C [17].



Obrázek 24 Příklad změny napětí s teplotou - přeloženo z [13]



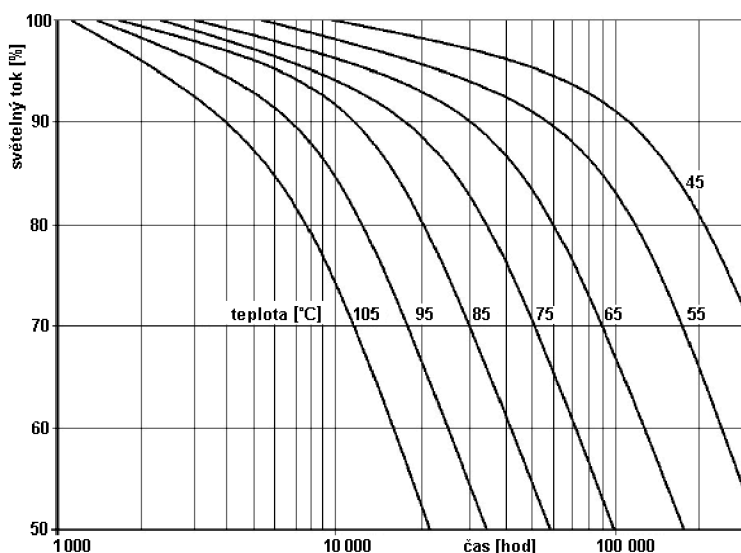
Obrázek 25 Seoul Semiconductors - Relativní změna napětí s teplotou - přeloženo z [27]

Na obrázku 25 vidíme změnu napětí na LED diodě s teplotou. Hodnota relativního napětí 1.0 odpovídá 100 % napětí při 25 °C. Jak lze vidět, v extrému 125 °C se napětí posune přibližně na 90 % původní hodnoty.

6.1.5 Životnost

Životnost LED značí časový údaj, jak dlouho dokáže dioda svítit, než její světelný tok dosáhne určitého poklesu. Výrobci tuto hodnotu volí zpravidla na 70 % původního světelného toku.

Pokud je z LED dobře odváděné teplo, může se její životnost pohybovat přes 50000 hodin. Při běžném provozu (LED nesvítí nepřetržitě) to může znamenat i přes 20 let. Je pravděpodobné, že za takovou dobu morálně zestárne a dojde k její výměně za model s vyšším měrným výkonem, barevným podáním nebo jinými vylepšenými parametry. Existují však samozřejmě i oblasti, kde má vysoká životnost světelných diod význam, jako prostory či objekty vyžadující trvalé osvětlení či méně častou údržbu.



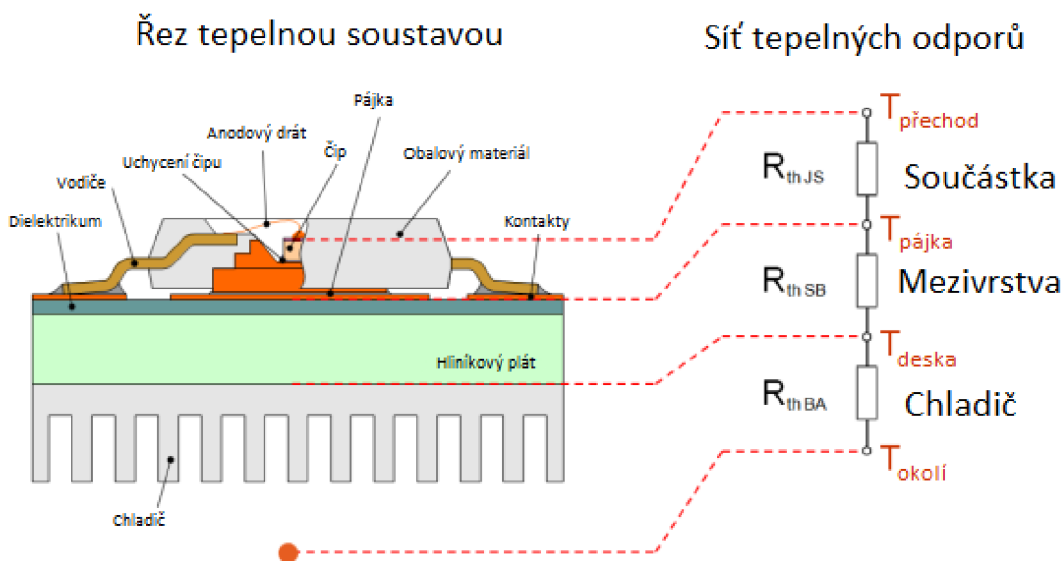
Obrázek 26 Degradace světelného toku při různých teplotách – převzato z [21]

Pokud bychom se však nezaměřovali pouze na životnost LED diod samotných, ale vzali bychom do úvahy celé osvětlovací řešení včetně napájení, bývá právě ono častějším zdrojem poruch a tedy slabším článkem soustavy [15].

6.2 Tepelný management

Protože jsou diody teplotou silně ovlivňovány, má jejich tepelný management významnou roli. Důvodem selhání diod v provozu totiž bývá nejčastěji právě teplota. Pouze pokud je tepelný management proveden správně, mohou mít tedy LED diody správné technické parametry a životnost.

Cílem tepelného managementu je dosáhnout co nejkvalitnějšího převodu tepla z čipu do okolí.



Obrázek 27 Tepelný management - přeloženo z [10]

Základní rozdělení tepelného systému výkonné LED diody má tři úrovně:

- Dioda
- Mezihrstvá – keramický substrát nebo PCB (Printed Circuit Board - deska tištěných spojů)
- Chladič

Tepelný management na úrovni samotné LED diody je předurčen jejím designem, tedy tím kdo a jak ji vyrobil [10].

Při návrhu tepelného managementu je vhodné uvažovat, zda použít jednu LED s vysokým výkonem, nebo použít více slabších. Jedna LED bude kompaktnější, s více menšími diodami bude zase rovnoměrnější rozložení tepla při vývodu na PCB. Existují také moduly, které kombinují oboje a v jednom balení nabízejí více diod při zachování malých rozměrů. Dále hraje roli samozřejmě cena, způsob použití a okolní podmínky.

6.2.1 Druhy přenosu tepla

Přenos tepla se dá rozdělit do tří kategorií:

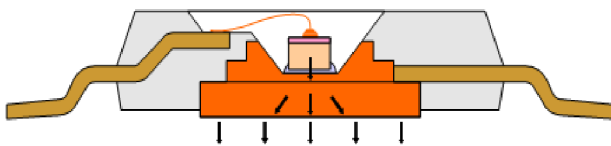
- Vedení
- Proudění
- Vyzařování

Vedení nebo také kondukce se uplatňuje skrze pevné materiály. Je to nejdůležitější způsob přenosu tepla u LED modulů a je na něm založena cesta tepla z čipu diody na chladič.

Proudění, jinak též konvekce je přenos tepla pohybem plynů a kapalin. V systémech s LED se většina konvekce odehrává při přenosu tepla vyzařeného z chladiče do okolí. Proudění okolního prostředí potom může být pasivní, nebo aktivní, kdy je na chladiči připevněn větrák.

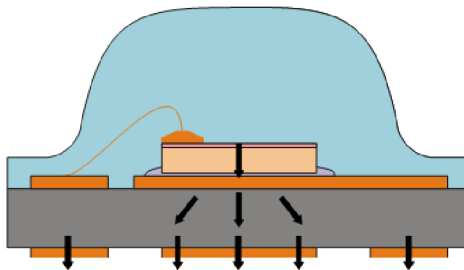
Třetím způsobem přenosu tepla je vyzařování. V LED systémech se uplatňuje podle toho, jak jsou výkonné a tedy podle velikosti použitého chladiče, na jehož velikosti je vyzařování závislé [10, 17].

6.2.2 Možnosti konstrukce tepelné cesty



Obrázek 28 Odvod tepla přes vodivý rámeček - převzato z [10]

Na obrázku 28 vidíme možný princip přenosu tepla pomocí rámečku, ke kterému je zároveň připojen jeden z kontaktů (většinou katoda). Tento rámeček je vyroben z kovu, což jsou obecně vzata nejlepší tepelné vodiče, takže umožňují odvádět velké množství tepla. Nevýhodou je zde ovšem fakt, že teplovodivý kontakt není od čipu nijak elektricky izolován [10].



Obrázek 29 Odvádění tepla přes keramický substrát – převzato z [10]

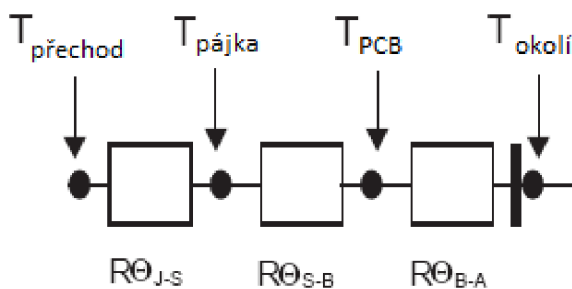
Obrázek 29 ukazuje průřez diodou, u které teplovodivá cesta přechází přes vrstvu keramického substrátu. Zde je čip LED připojen na pokovenou vrstvu keramiky s dobrou tepelnou vodivostí. Výhodou tohoto řešení je cena a také elektrická izolace teplovodivého kontaktu [10, 22]. Nevýhodou může být křehkost keramiky způsobující její praskání za určitých podmínek [23].

Při vytváření systémů s více LED se připojují na tzv. MCPCB, což znamená tepelně vodivou desku plošných spojů (Metal Core Printed Circuit Board) [10].

6.2.3 Tepelný odpor

Protože teplo, jenž se vytváří na LED diodě, je úměrné elektrickým ztrátám, zavedla se tepelná schémata. Ta mají analogii s elektrickými schémata. V elektrických obvodech figuruje napětí, jenž je vlastně rozdílem potenciálů mezi vstupem a výstupem. V elektrických obvodech je obdobou teplota, která má na každé straně jinou hodnotu. Jak způsobuje rozdíl potenciálů v elektrických obvodech tok elektrického proudu, tak způsobuje rozdíl teplot tzv. tepelný tok, nebo také tepelný výkon. Jemu stojí v cestě odpor.

Tepelný odpor je velice potřebné udržovat v rámci tepelného managementu na co nejnižších hodnotách. Jak již bylo naznačeno výše na obrázku 27, tepelné schéma neobsahuje pouze jeden odpor, ale dá se rozdělit na několik. Na níže uvedeném obrázku jsou uvedeny tři odpory, ale podle použitého typu tepelného managementu jich může být více nebo i méně [11].



Obrázek 30 Odvod tepla z diody vyjádřený pomocí tepelných odporů – upraveno z [11]

Celkový tepelný odpor lze spočítat jako součet dílčích odporů [17]:

$$R_{\theta_{j-a}} = R_{\theta_{j-s}} + R_{\theta_{s-b}} + R_{\theta_{b-a}} \quad (6.1)$$

Přičemž jednotlivé složky značí:

- $R_{\theta_{j-a}}$ tepelný odpor mezi PN přechodem a okolím (junction – ambient)
- $R_{\theta_{j-s}}$ tepelný odpor mezi PN přechodem a pájkou (junction – solder)
- $R_{\theta_{s-b}}$ tepelný odpor mezi pájkou a deskou plošných spojů (solder – PCB)
- $R_{\theta_{b-a}}$ tepelný odpor mezi deskou plošných spojů a okolím (PCB – ambient)

Z hlediska samotného LED čipu tedy figuruje pouze $R_{\theta_{j-s}}$, který je udáván výrobcem v katalogu. Ostatní odpory jsou otázkou zvoleného tepelného managementu (PCB, chladič a jejich propojení) [11].

Hodnota $R_{\theta_{j-s}}$ nám také umožňuje určit, jaká je teplota čipu LED, jelikož přímé měření této hodnoty je nemožné. Spočítáme ji následujícím způsobem [17]:

$$T_j = T_a + P_e \cdot R_{\theta_{j-s}} \quad (6.2)$$

T_j – Teplota na PN přechodu (°C)

T_a – Teplota okolí (°C)

P_e – Příkon diody (W)

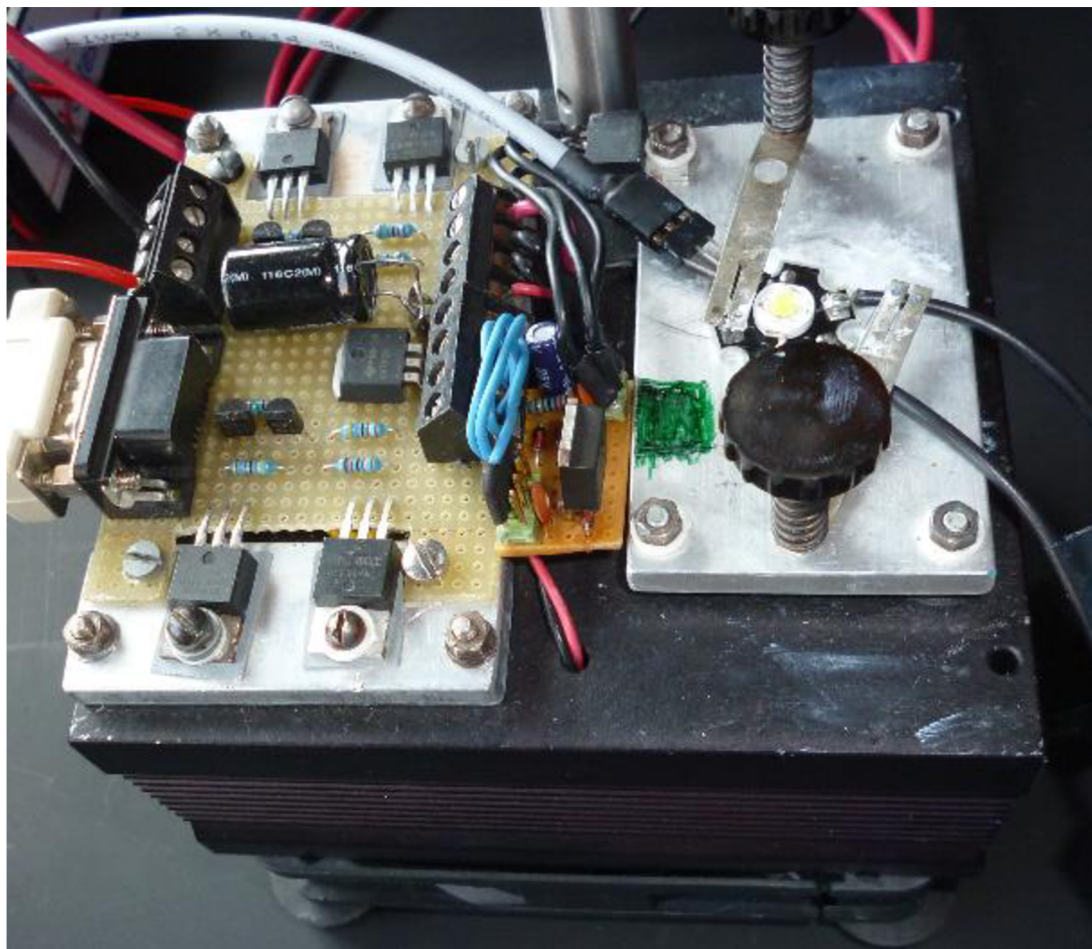
$R_{\theta_{j-s}}$ – Tepelný odpor mezi PN přechodem a okolím (°C/W) [17]

7 MĚŘENÍ

7.1 Rozbor měření

Protože cílem této práce je popis závislosti parametrů LED na teplotě a jejich ověření praktickým měřením, bylo třeba vytvořit pracoviště, na kterém je možno regulovat teplotu PN přechodu. Základem tohoto pracoviště se stal chladič osazený Peltierovým článkem a ventilátorem. Ten umožňuje okamžitou tepelnou regulaci, což je výhodné především z hlediska časové náročnosti měření. Zároveň však toto řešení zabránilo použití kulového integrátoru, který kvůli přecházející elektronice Peltierova článku nebylo možné na LED osadit. Proto bylo nezbytné použít fotočlánek s kosinovým nastavcem, které je kompaktní a umožňuje měřit světelné parametry zdroje z dostatečné vzdálenosti. To ovšem zároveň znamená nezbytnost zatemněného měřicího prostoru bez odrazových ploch, aby okolní prostředí neovlivňovalo měření. Tyto podmínky skvěle splnila laboratoř světelné techniky, která nabízí možnost zatemnění prostoru a jejíž stěny jsou natřeny matnou černou barvou.

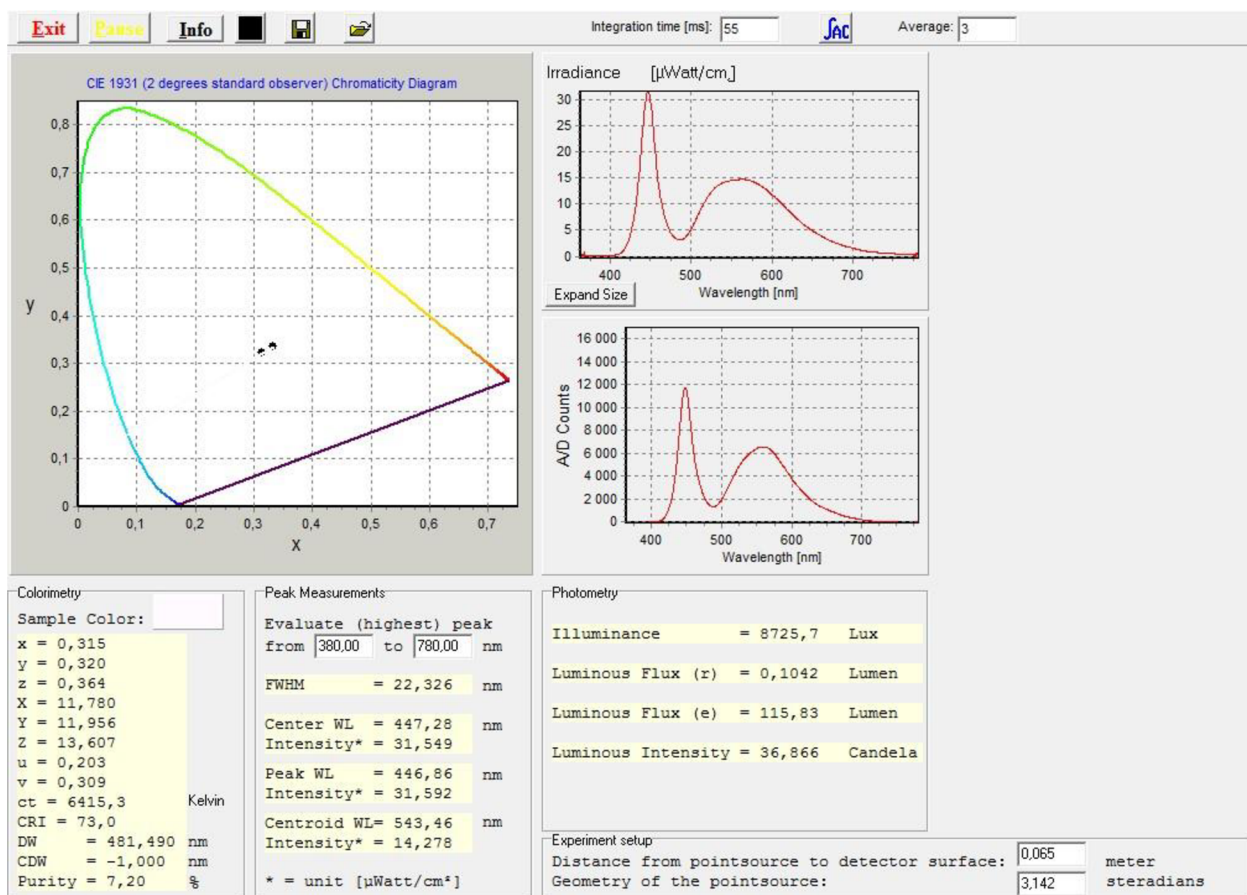
Použitý fotočlánek s kosinovým nastavcem se ukázalo jako vhodné i z hlediska přesnosti měření, neboť v použitém měřicím programu Avasoft lze softwarově nastavit fotometrickou vzdálenost a geometrii světelného zdroje. Při srovnání měření s teoreticky přesnějším kulovým integrátorem se po softwarovém nastavení hodnoty téměř nelišily.



Obrázek 31 Chladič s Peltierovým článkem osazený LED

Samotné měření světelných parametrů včetně spektrometrie měl na starost spektrometr AVANTES Avaspec-2048. To je přístroj, ke kterému je veden vstupní signál pomocí optického vlákna. To je vyměnitelné a umožňovalo tedy záměnu za vlákno, které bylo pro měření nejvhodnější a u kterého nenastávalo přesaturování spektrometru díky vyššímu útlumu.

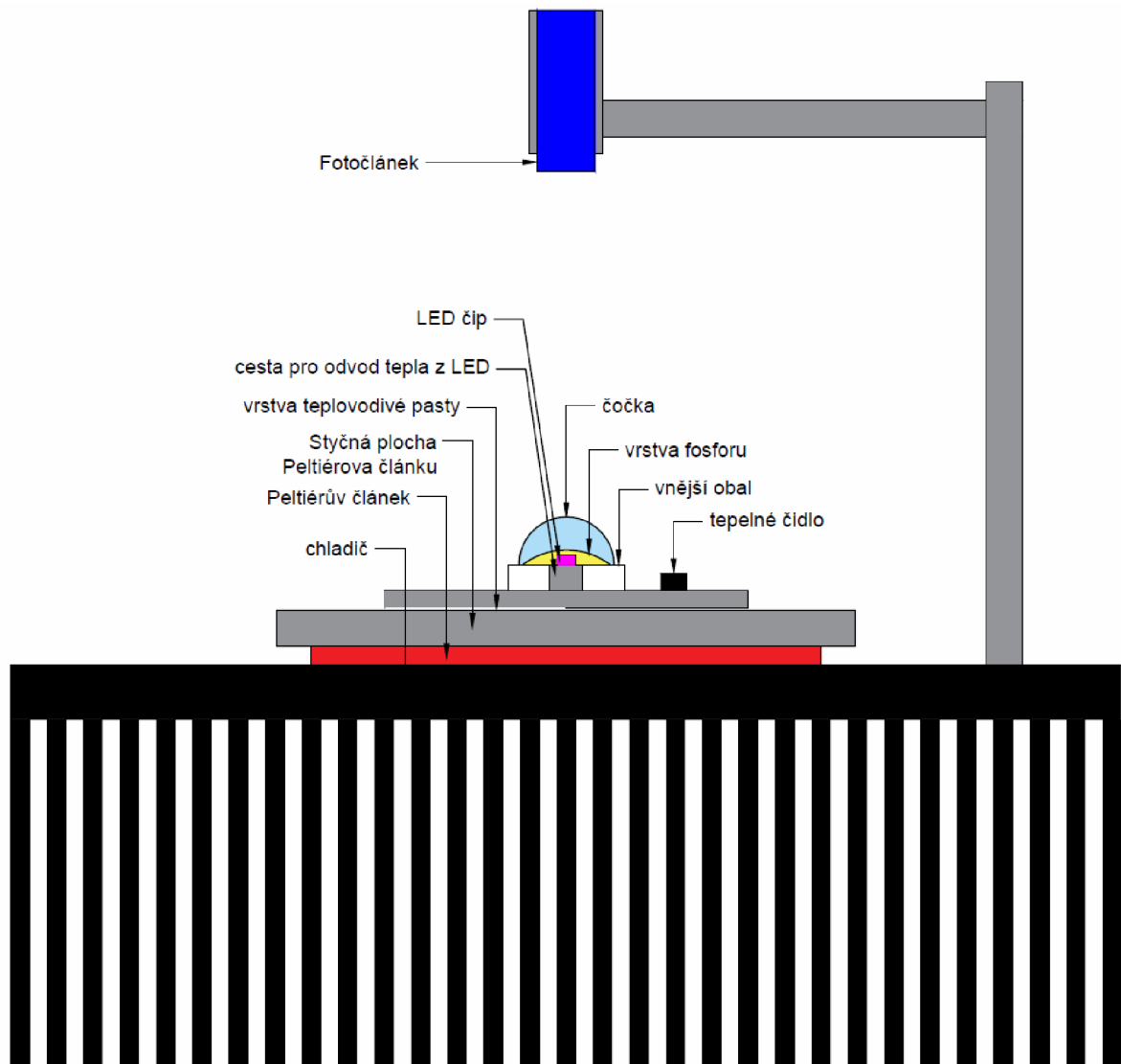
Použité vlákno AVANTES FC-UV200-2 je typu UV/VIS, což znamená průměr vlákna 200 μm a možnost použití pro UV záření a viditelné světlo.



Obrázek 32 Ukázka prostředí Avasoft

K měření teploty LED bylo použito teplotní čidlo DALLAS DS18B20, které umí měřit teploty od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jde o digitální čidlo, které lze přes mikroprocesor připojit k PC. Bohužel, obslužný software umožňuje nejkratší dobu integrace 15 s, což znamená takto dlouhý interval mezi jednotlivými měřeními. Protože na měřených vzorcích LED nebylo vyznačeno místo pro referenční měření, bylo rozhodnuto, že se umístí na PCB diody na jeden z volných elektrických kontaktů. To je opodstatněno tím, že teplota na čipu LED t_j je zjištěna pomocí vzorce 6.2 a zvolená LED má v katalogu udaný tepelný odpor mezi čipem a plochou PCB. Umístění teplotního čidla je vyobrazeno na obrázku 33.

Pro napájení LED byl použit měřicí přístroj Keithley 2601B. Tento přístroj je totiž schopen pracovat jako proudový zdroj a jde zároveň o poměrně přesný měřicí přístroj schopný přímo měřit napětí. Měřicí pracoviště se díky tomu obešlo bez dodatečného voltmetru.



Obrázek 33 Schématické znázornění měřícího pracoviště

Měření bylo provedeno na deseti kusech bílé LED výrobce Vigan model GT – P03W54101140. Byla vybrána jako velmi levný model již dodávaný na PCB typu HEXAGON.

LED má následující katalogové hodnoty:

- Světelný tok: 140 – 150 lm
- Náhradní teplota chromatičnosti: 5500 – 6000 K
- Index barevného podání Ra: 60 – 90
- Napětí: 3,0 – 3,6 V
- Jmenovitý proud: 350 mA
- Tepelný odpor: 12 °C/W
- Provozní teplota: -40 – 60 °C
- Teplotně-napěťový koeficient: -5 mV/°C



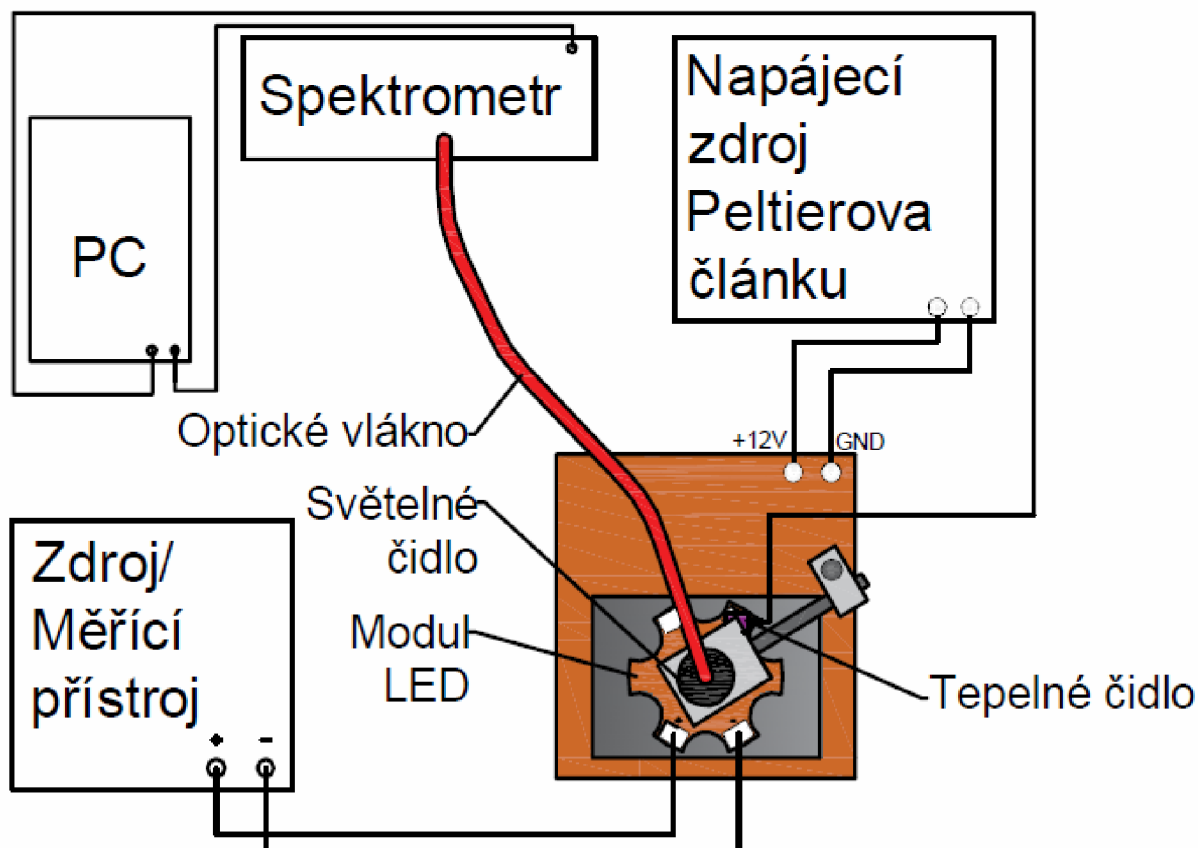
Obrázek 34 Měřená LED (ilustrativní obrázek) – převzato z [32]

Cílem tohoto měření bylo zjistit, jak se bude chovat výkonná dioda při obyčejném osvětlovacím provozu, pokud bude vystavena různým teplotám. To znamená, že LED byla napájena stabilizovaným proudovým zdrojem při jmenovité hodnotě proudu 350mA a teplota na přechodu byla regulována pomocí Peltierova článku.

Pro zjištění teploty PN přechodu byl použit vzorec 6.2, využívající znalosti tepelného odporu. Dále je potřeba znát elektrický příkon a velikost teploty na povrchu kontaktu PCB, pro kterou je tepelný odpor udán. Uvedeme si zde příklad výpočtu pro teplotu PCB $t_k = 40\text{ °C}$ u vzorku číslo 10.

$$P_e = U \cdot I = 3,409 \cdot 0,350 = 1,193\text{ W} \quad (6.3)$$

$$t_j = t_k + P_e \cdot R_{\theta j-k} = 40 + 1,193 \cdot 12 = 54,318\text{ °C} \quad (6.4)$$



Obrázek 35 Schéma zapojení měřícího pracoviště

7.2 Použité měřicí přístroje a pomůcky

Tabulka 2 Soupis měřících přístrojů a pomůcek

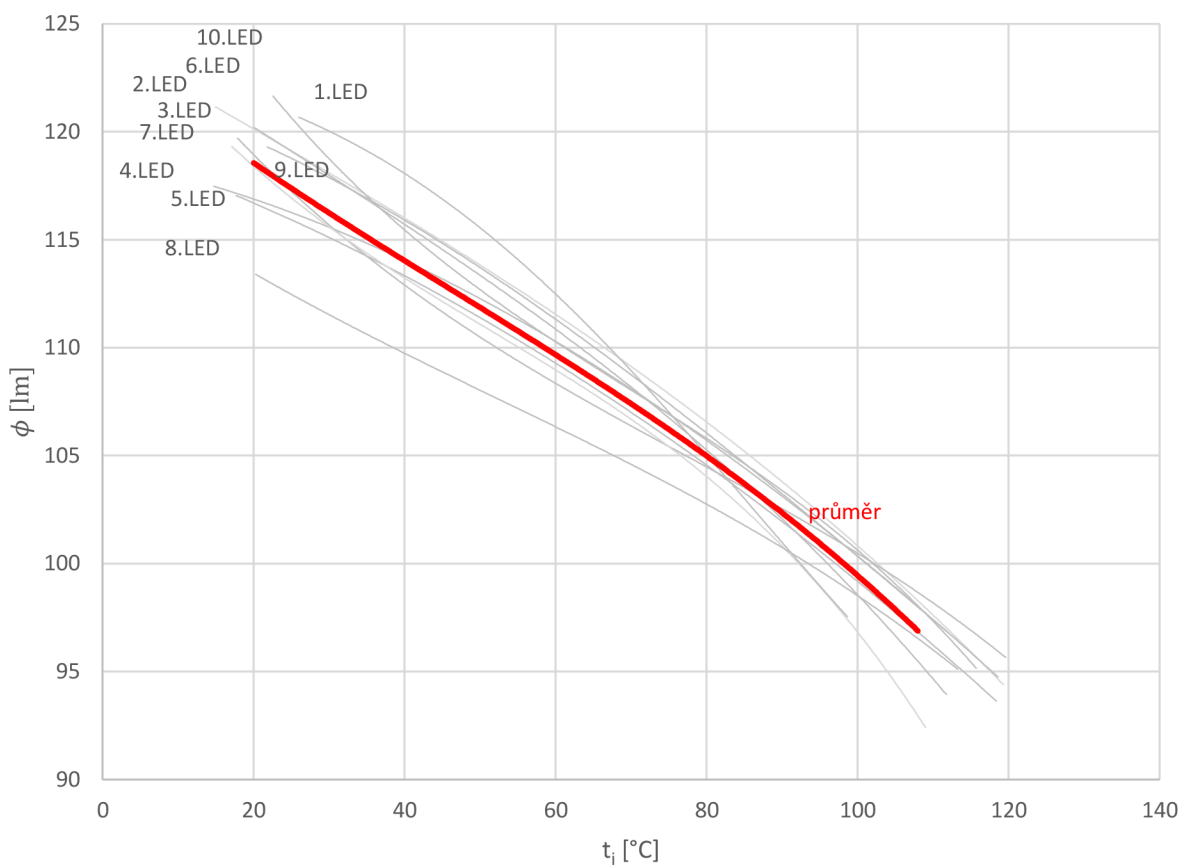
Přístroj	Typ přístroje	Výrobní číslo	SAP
Zdroj k napájení Peltierova článku	Diametral V140R50D	1232262312	SAP001000216113-0000
Spektroradiometr	AVANTES Avaspec-2048	0301035S1	SAP001000124331-0000
Zdroj/Měřicí přístroj k LED	Keithley 2601B	07430/06-ECZ	SAP000000318175-0000
Optické vlákno	AVANTES FC-UV200-2	0405024	
Termočidlo	DALLAS 18B20	1302C4	
Chladič s Peltierovým článkem	Laboratorní přípravek		
PC			

7.3 Měřené hodnoty

Aby bylo dosaženo pokud možno nejprůkaznějšího měření, byly teplotní závislosti změřeny na každém z deseti vzorků LED a poté byly hodnoty zprůměrovány. V grafech jsou pro ilustraci kromě průměrů zobrazené také hodnoty jednotlivých měřených LED. Je možné si povšimnout, že se jednotlivé vzorky v některých případech rozcházejí, přestože by mělo jít o stejnou výrobní šarži. To je ovšem vzhledem k ceně omluvitelné, diody se navíc rozcházejí především ve velikosti vstupního napětí a výstupního světelného toku. Jejich barevné podání světla je velice podobné a pro běžné osvětlovací účely, kde se v jednom svítidle nachází větší množství těchto LED, jsou použitelné.

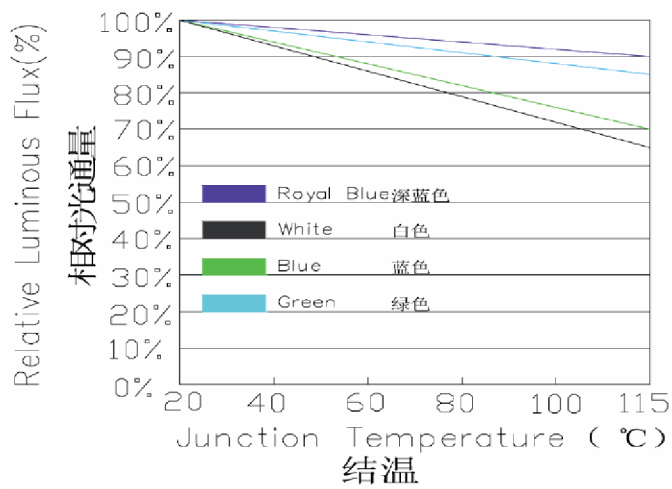
7.3.1 Vliv teploty PN přechodu na velikost světelného toku LED

Změna světelného toku s teplotou PN přechodu



Jak již bylo řečeno, světelný tok LED se zvyšující se teplotou přechodu klesá. Je to dáno tím, že s rostoucí teplotou stoupá i počet nezářivých rekombinací v PN přechodu.

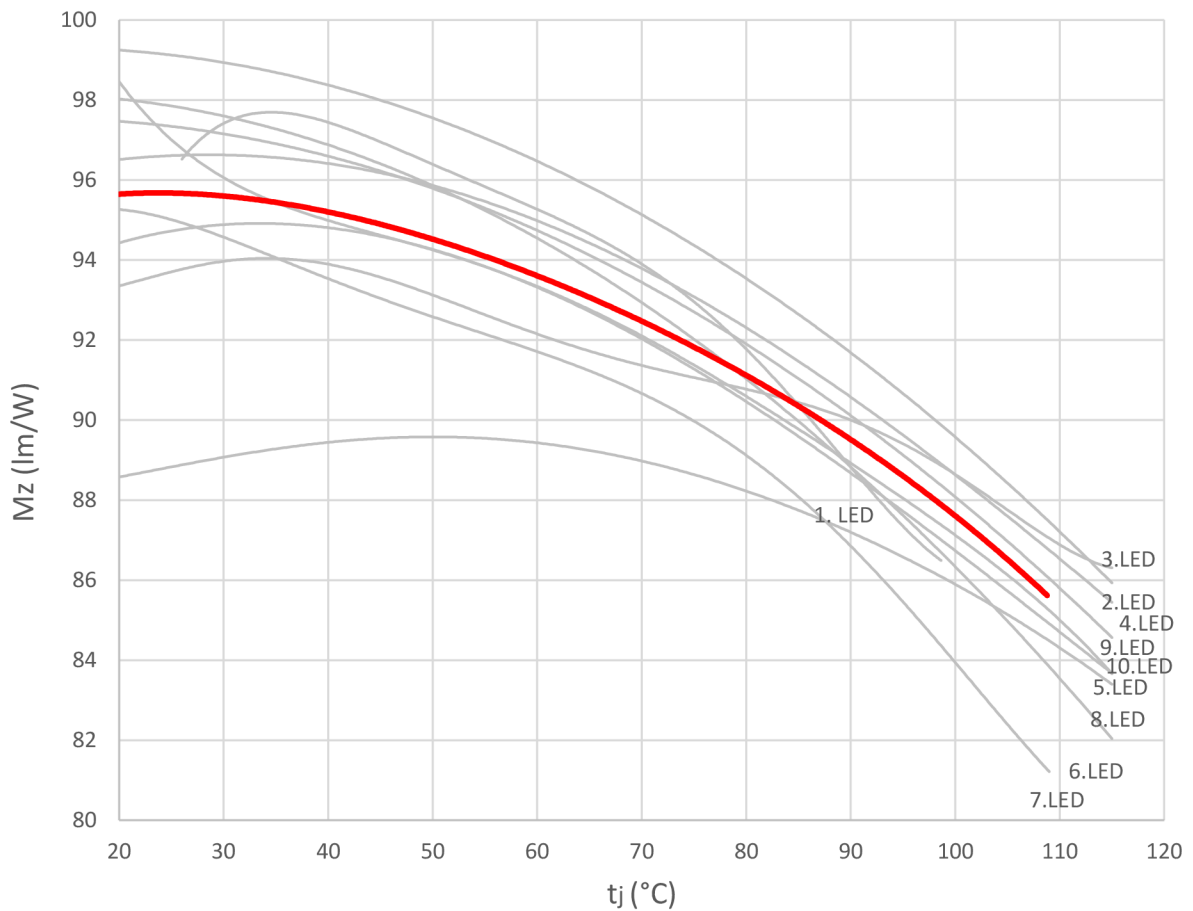
Z měření vyplývá, že průměrný pokles světelného toku při zvýšení teploty z 20 °C na 110 °C je přibližně 20 %. V porovnání s níže uvedeným grafem z katalogu výrobce testované LED je na stejném rozsahu pokles asi 30 %. To zní sice jako dobrá zpráva, ovšem je třeba mít na paměti, že výrobce udává světelný tok při jmenovitých parametrech 140 – 150 lm. Při praktickém měření se i při intenzivním chlazení nepodařilo dostat vysoko nad hodnotu 120 lm.



Obrázek 36 Pokles světelného toku s teplotou podle katalogu výrobce – převzato z [33]

7.3.2 Vliv teploty PN přechodu na měrný výkon LED

Závislost měrného výkonu LED na teplotě PN přechodu



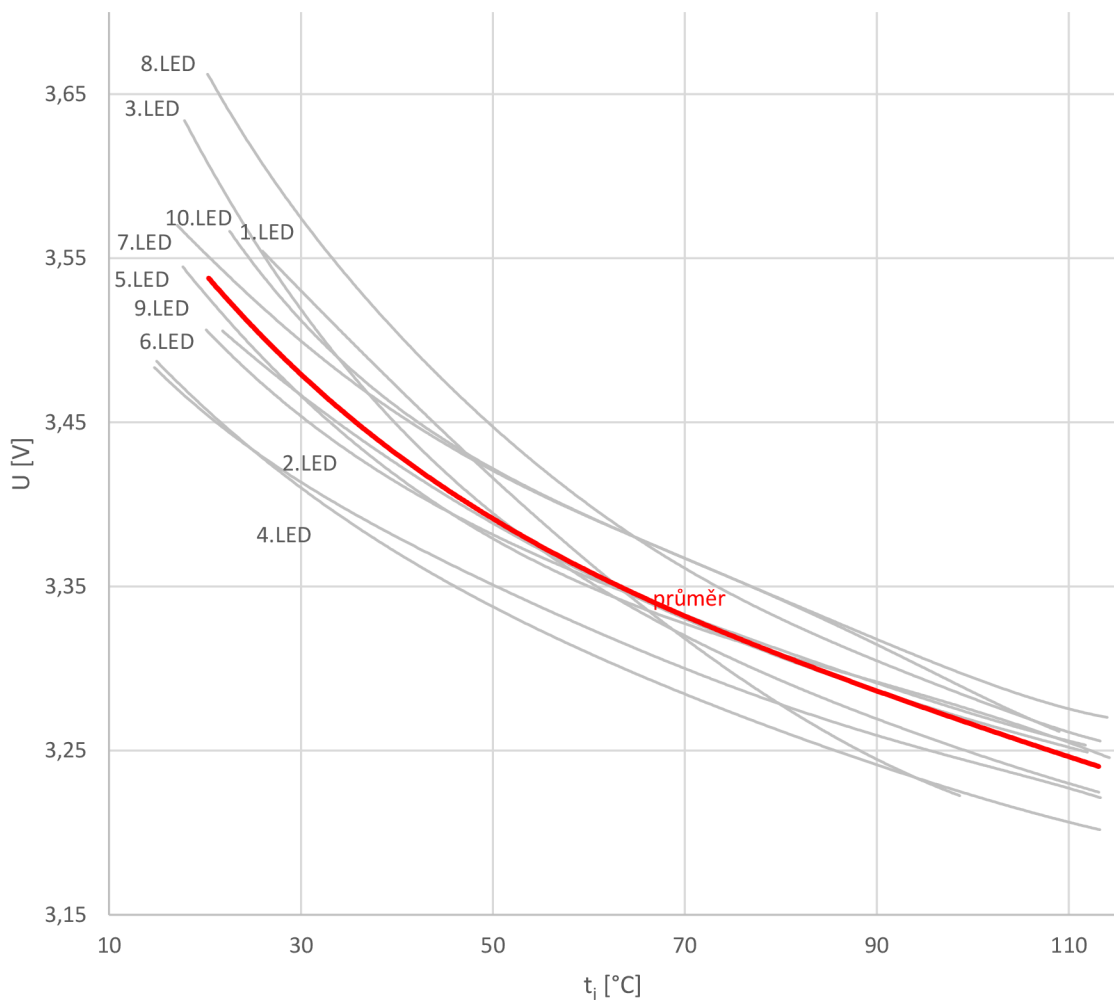
Měrný výkon s teplotou klesá. To je dáno tím, že klesá produkovaný světelný tok. Zároveň ovšem klesá i příkon. Při nízkých teplotách to znamená, že se měrný výkon příliš nemění. Jakmile se teplota začne zvyšovat, začne se však pokles světelného toku projevovat více, což má za následek výrazné snižování měrného výkonu.

Příklad výpočtu měrného výkonu pro teplotu PCB $t_j = 30\text{ °C}$ u vzorku číslo 5:

$$M_z = \frac{\phi}{P_e} = \frac{115,29}{1,214} = 94,98\text{ lm/W} \quad (6.5)$$

7.3.3 Závislost změny vstupního napětí LED na teplotě PN přechodu

Závislost napětí na teplotě přechodu



U LED se vzrůstající teplotou napětí klesá. Neplatí to pouze u LED, ale i u obyčejných diod. Je to způsobeno obecnou vlastností polovodičových materiálů, záporným teplotním součinitelem odporu. To znamená, že u polovodičů s teplotou roste vodivost, což má za následek snižování potenciálové bariéry.

V katalogích bývá udána hodnota teplotně-napěťového koeficientu, který udává napěťový úbytek na stupeň Celsia. Protože napětí klesá, má tento koeficient zápornou hodnotu. Závislost napětí na teplotě bývá u většiny LED přibližně lineární, což umožňuje spočítat teplotně-napěťový koeficient jako derivaci napětí podle teploty. Výše uvedená charakteristika zcela lineární není, takže pokud chceme tento koeficient spočítat, můžeme zjistit rovnici křivky (lze provést v programu Microsoft Excel) a hodnotu spočítat pro konkrétní místo v grafu, nebo se můžeme spokojit s průměrnou hodnotou.

V našem případě je katalogová hodnota tohoto koeficientu $-5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ a vypočtená průměrná hodnota je $-4,9 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

Zjištěná rovnice křivky závislosti napětí na teplotě vypadá následovně:

$$U = 2 \cdot 10^{-9} \cdot t_j^4 - 7 \cdot 10^{-7} \cdot t_j^3 + 0,0001 \cdot t_j^2 - 0,0108 \cdot t_j + 3,7142 \quad (6.6)$$

Jak bylo uvedeno výše, teplotně-napěťový koeficient lze spočítat jako derivaci rovnice podle teploty. Pokud derivaci provedeme, vznikne:

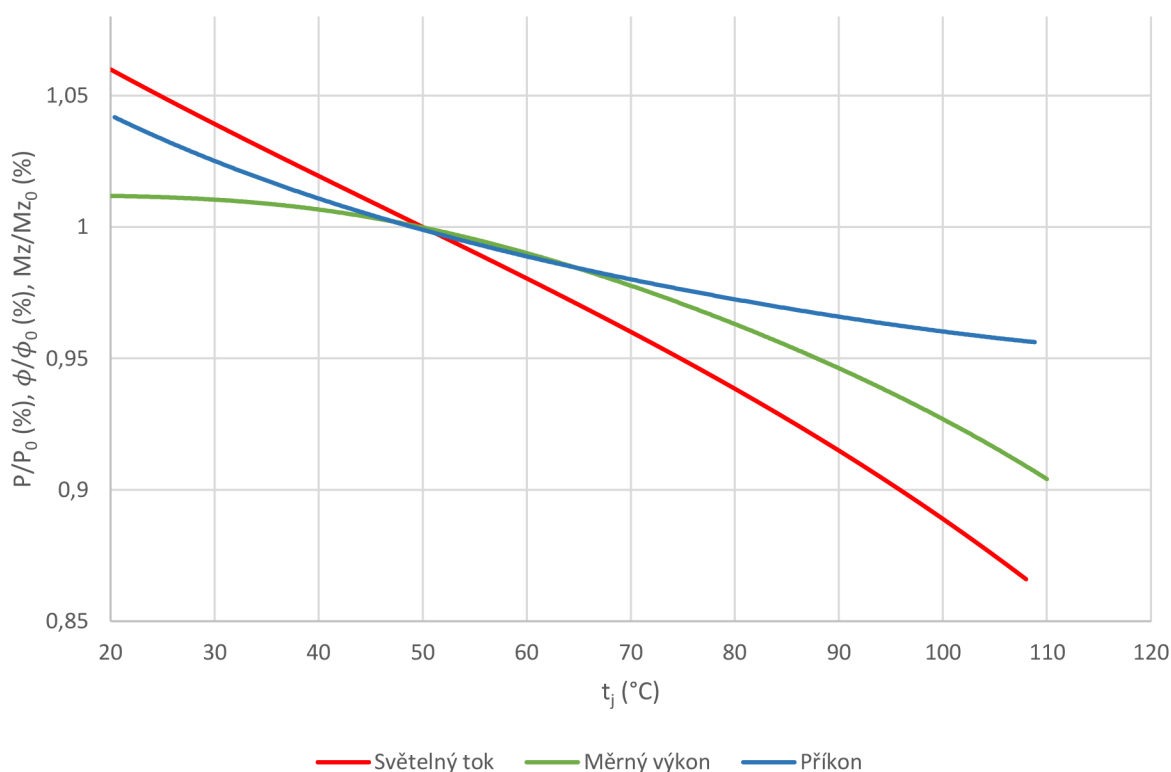
$$\frac{dU}{dt_j} = 8 \cdot 10^{-9} \cdot t_j^3 - 21 \cdot 10^{-7} \cdot t_j^2 + 0,0002 \cdot t_j - 0,0108 \quad (6.7)$$

Pak už stačí dosadit příslušnou teplotu a vyjde nám požadovaný výsledek.

Z grafu je například vidět, že křivka má nejvyšší strmou v počátku. Pokud tedy zkusíme dosadit do rovnice 6.7, zjistíme, že pro 20°C vychází hodnota teplotně-napěťového koeficientu $-7,53 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Pokud totéž zkusíme při hodnotě teploty 100°C , vyjde hodnota $-3,82 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

7.3.4 Křížová charakteristika

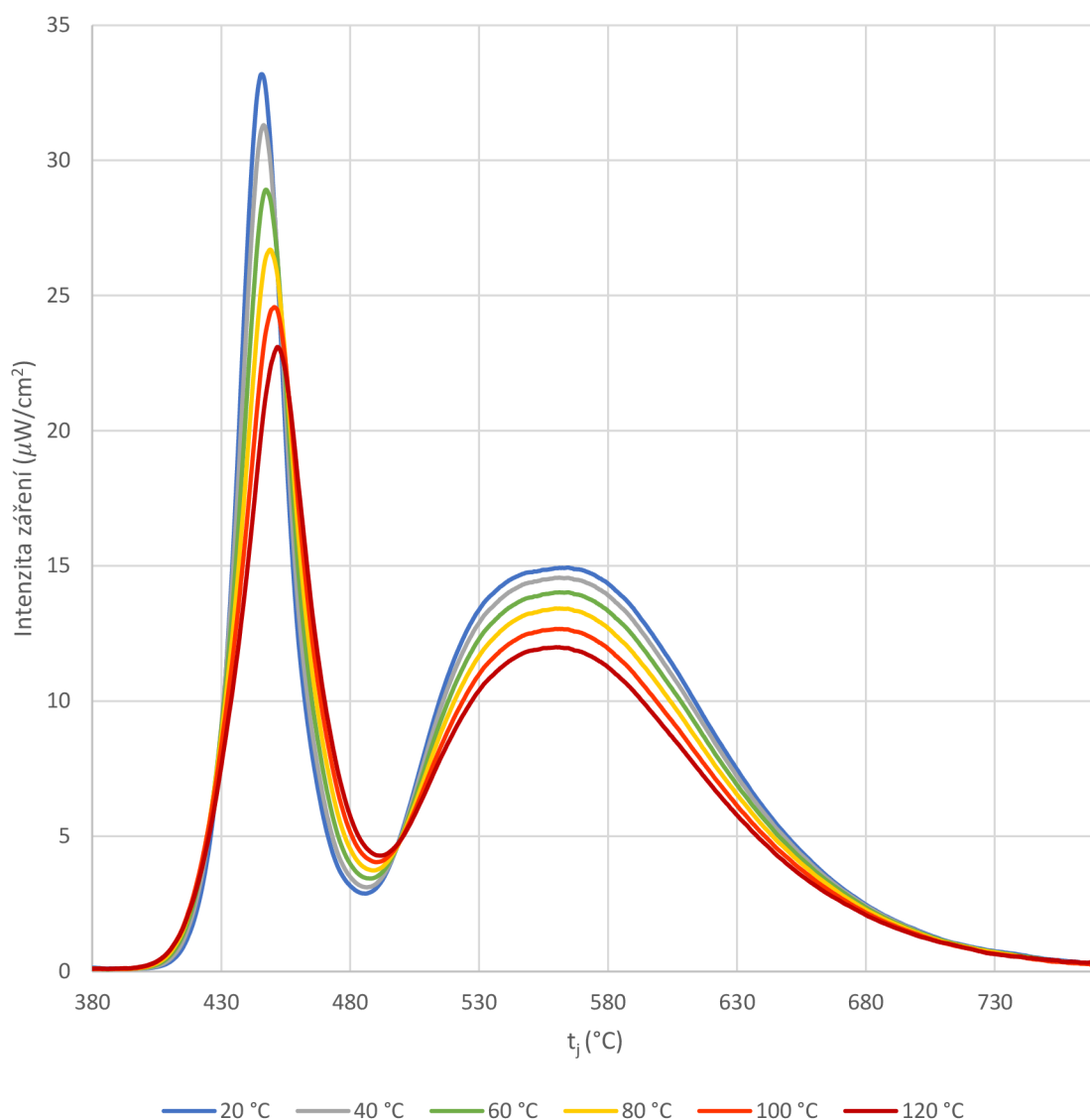
Křížová charakteristika LED v relativních hodnotách



Z křížové charakteristiky vidíme, že, jak už bylo částečně řečeno výše, při nízkých teplotách není pokles měrného výkonu tak patrný, neboť křivka světelného toku a příkonu klesá s podobnou strmostí. Přibližně kolem teploty 50 °C, která byla zvolena jako referenční, dochází ke snižování strmosti poklesu příkonu, což ve výsledku znamená výraznější pokles měrného výkonu.

Protože v katalogu je uvedena jako maximální trvalá provozní teplota 60 °C, byla jako referenční vybrána teplota 50 °C, teplota nižší, ale stále dosažitelná, při které ještě nedochází k významné degradaci parametrů. Navíc má dioda výkon pouze 1 W, takže teploty 50 °C by při dobře vyřešeném chlazení neměl být problém dosáhnout.

7.3.5 Vliv teploty PN přechodu na kolorimetrické vlastnosti LED



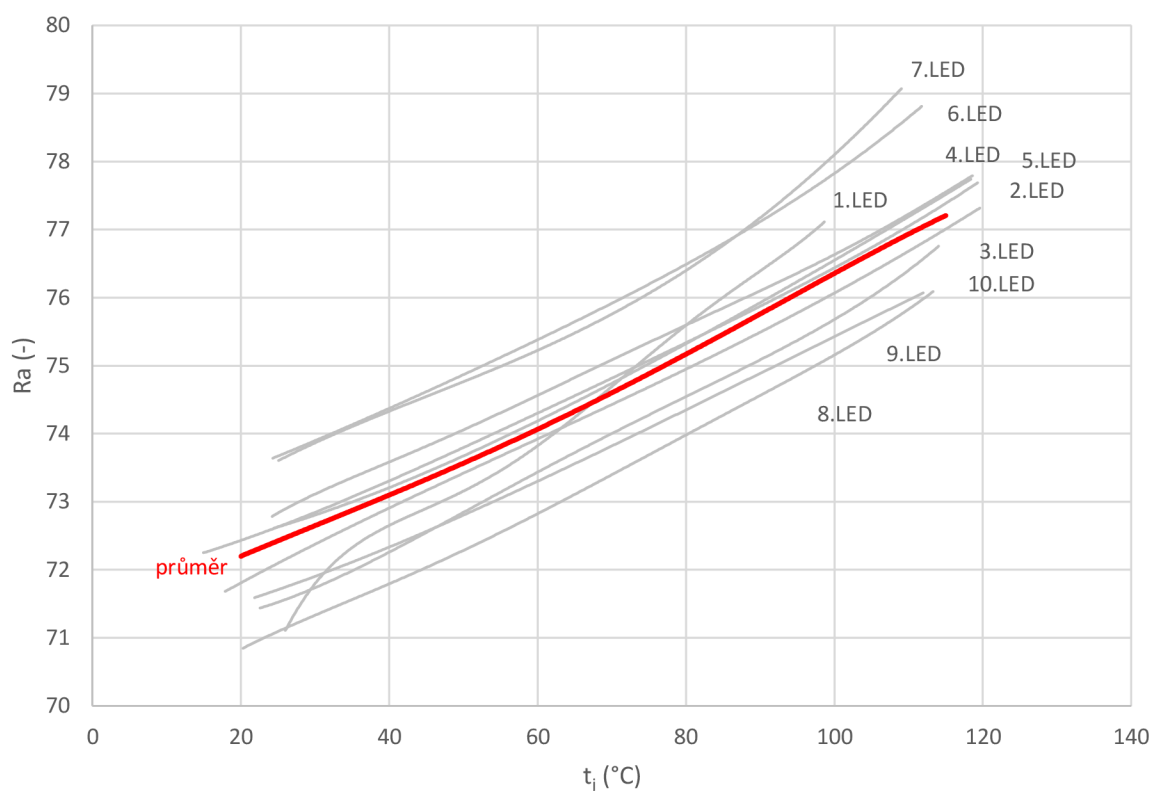
Z výše uvedeného grafu je na první pohled viditelné, že měřená LED patří barvou světla mezi studené bílé. Je to dáno výraznou špičkou oblasti mezi 380 a 480 nm. To je oblast tvořená spektrem použité diody, jejíž barva je modrofialová až modrá. Tato LED, přestože cenově patří mezi ty nejlevnější, nabízí poměrně slušný měrný výkon. To je dáno použitým luminoforem, který nedokáže konvertovat tak velké množství modrého světla na žluté, což značí vyšší účinnost za cenu

zhoršeného barevného podání. Na obrázku závislosti indexu podání barev Ra na teplotě můžeme vidět, že jeho velikost nedosahuje v žádném případě ani 80, což by bylo potřeba jako minimum pro použití v obytných prostorech. Měřený typ LED se tedy hodí především pro použití v exteriérech.

Pokud se zaměříme na závislost spektra LED na teplotě, můžeme si povšimnout, že kromě snižování intenzity záření dochází též k posunu dominantní vlnové délky modré LED. Přestože modrá LED samotná je z monochromatických LED obecně nejméně teplotně závislá, je při velké změně teploty posun na vyšší vlnovou délku znatelný. Na vlnové délce modrého světla je potom závislá i efektivita přeměny světla v luminoforu.

Ačkoli při změně teploty dochází ke snižování intenzity modrých vlnových délek, intenzita žlutých vlnových délek produkovaného luminoforem klesá méně. To znamená, že se zvyšující se teplotou dochází k posunu k teplejším barvám. Mimo jiné to též znamená, že se zvyšuje index podání barev.

Závislost indexu podání barev na teplotě



Pokud porovnáme změřený index barevného podání Ra s katalogovými hodnotami, zjistíme, že rozsah sice odpovídá, je ovšem udán tak volně, že vlastně o ničem nevypovídá. Ra = 60 – 90 totiž znamená, že se pohybujeme mezi zdrojem světla nepoužitelným v jakémkoli, byť pracovním interiéru a mezi zdrojem vhodným i pro trvale obytné prostory. Zde se opět projevuje nízká cena testované LED, většina diod od renomovaných výrobců má rozsah možných velikostí Ra 5 nebo maximálně 10.

8 ZÁVĚR

Protože nejvýznamnější část LED tvoří bílé diody určené k osvětlování, bylo rozhodnuto, že práce bude zaměřena hlavně na výkonné bílé LED. V dnešní době se běžně vyrábí LED, které mají měrný výkon přesahující 100 lm/W s příkonem v řádu wattů. Se zvyšujícím se měrným výkonem ovšem roste požadavek na odvod tepla. U velmi výkonných LED dokáže masivní chladič docela zvrátit představu o LED jako kompaktním světelném zdroji. Bez odvodu tepla však dochází ke změně prakticky všech parametrů diody. Mění se světelný tok, spektrum a barevné podání světla či napětí.

Praktická část práce se proto zabývá měřením závislosti nejdůležitějších světelně-technických parametrů LED na teplotě. Teplota na přechodu zde ovšem nebyla řízena pomocí zvyšování proudu a případně dodatečným zahříváním, ale čistě Peltierovým článkem s chladičem, přičemž hodnota proudu byla udržována konstantní stabilizovaným proudem. Jde tedy o simulaci toho, jak se budou výkonové LED chovat v osvětlování za použití LED driveru jako zdroje stabilizovaného proudu při různých úrovních kvality tepelného managementu.

K měření byla zvolena LED Vigan model GT – P03W54101140. Šlo totiž o to vybrat LED, která se řadí mezi výkonové, ovšem zároveň nesmělo jít o LED příliš výkonnou, která by produkovala tolik tepla, že by bylo nemožné ji významným způsobem zchladit použitým Peltierovým článkem. Proto byla vybrána tato 1 W LED. Dalším kritériem výběru byla cena. Aby bylo měření co nejprůkaznější, bylo nutné vybrat LED s nízkou cenou, což umožnilo nákup více kusů, jejichž výsledky se následně zprůměrují. Následujícím kritériem bylo, aby byla LED již osazena na PCB a aby byl výrobcem garantován odpor mezi čipem diody a teplovodným kontaktem PCB. A konečně, jde o velmi levnou 1 W LED s udávaným světelným tokem 140 lm, přičemž drtivá většina konkurence při této ceně udává 120 lm. Posledním kritériem tedy byla zvědavost, zda je toto uskutečnitelné.

Při měření byla LED pro co nejlepší přenos tepla připevněna k chladiči teplovodivou pastou. Tou bylo připevněno i čidlo pro měření tepla. Použitý Peltierův článek umožňoval regulaci teploty PN přechodu LED průměrně od 20 °C do 110 °C. Takových teplot nebylo však dosaženo na všech kusech. U některých se povedlo zchladit přechod až na 15 °C či zahřát na 120 °C. Výjimku zde tvoří první vzorek, u nějž se dosažené teploty pohybovaly od 25 °C do 100 °C. Pokud se podíváme do grafů na průběhy tohoto vzorku, můžeme si všimnout, že vždy dosti vybočuje. Z těchto důvodů byl označen jako vadný kus a při průměrování nebyl zahrnut. Nutno ovšem říci, že co do kolorimetrických parametrů tato LED nijak z řady nevybočovala a při použití v běžném osvětlení by obstála.

Po měření LED byla získána řada charakteristik. Na závislosti světelného toku na teplotě přechodu je vidět, že s rostoucí teplotou dochází při konstantním proudu k poklesu světelného toku. Oproti teoretické hodnotě z katalogu 140 lm bylo na LED naměřeno maximálně 120 lm. To je sice skromnější hodnota, i zavedení výrobcí ovšem někdy udávají hodnoty přibližně o 10 % nadhodnocené. Zde je hodnota nadhodnocena o přibližně 15 %, což by se dalo obhájit nízkou cenou.

Jak roste teplota, klesá též příkon diody. Jelikož však jeho klesání probíhá s menší strmostí než pokles světelného toku, klesá též měrný výkon diody. Jeho velikost je totiž přímo úměrná velikosti světelného toku a nepřímo úměrná příkonu. Přestože patří tato LED k těm levnějším, nabízí velmi slušný měrný výkon atakující při aktivním chlazení 100 lm/W.

Klesající tendence příkonu s teplotou znamená vzhledem ke konstantnímu proudu rovněž klesání napětí. To u měřené diody neklesá lineárně, takže pro zjištění teplotně-napěťového koeficientu byla charakteristika aproximována polynomem. Po jeho derivaci pak bylo možné zjistit hodnotu tohoto koeficientu pro jednotlivé body. Po zprůměrování pak vyšla hodnota $-4,9 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, přičemž katalogová hodnota je $-5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

Při měření kolorimetrických parametrů bylo objeveno, že s rostoucí teplotou se zvýší index barevného podání. To je, co se týče bílých LED obecně nestandardní chování. Je to patrně způsobeno charakterem spektrálního rozložení intenzity, kde je patrná velmi výrazná špička modrých vlnových délek, v porovnání s níž je intenzita žlutých vlnových délek velmi malá. Při růstu teploty tedy dochází výraznějšímu poklesu modré špičky, což má za následek posun spektra do teplejších barev a tedy i zvýšení CRI. Zda jde o obecnou vlastnost LED se studeným bílým světlem by však bylo nutno ověřit měření na více vzorcích.

Dalším důležitým parametrem LED je jejich životnost. Když jsou dlouhodobě namáhány, dochází ke změně prakticky všech jejich parametrů. Za dobu měření v rámci této práce diody nebyly namáhány na tolik, aby jejich parametry trvale degradovaly.

LED jsou známé svou velkou životností. Dobře chlazená LED může mít životnost výrazně převyšující 50000 hodin. Pokud je však dlouhodobě vystavována vysokým teplotám, ukončí svůj život třeba v polovině. Naštěstí nejsou LED jako žárovky, kde s prasknutím vlákna pozbydou schopnost svítit. Diody svítí dál, ovšem s podstatně nižším světelným tokem, což třeba v domácnostech nemusí až tak vadit. Při pozvolném klesání není úbytek světelného toku až tak výrazný a mohou se tedy vyměnit, až zkrátka přestanou dostačovat.

Závěrem by se dalo říci, že LED nacházejí čím dál větší uplatnění v osvětlování a pomalu vytlačují konvenční světelné zdroje. Dokáží nabídnout dlouhou životnost, malé rozměry či vysoký měrný výkon, který se u vrcholových komerčních modelů pohybuje již kolem $150 \text{ lm}/\text{W}$. Měrný výkon však může být jako v případě měřené LED vykoupen špatným indexem podání barev. Ovšem u kvalitních LED s teplou bílou barvou se na druhou stranu index podání barev pohybuje nad hodnotou $R_a = 90$ při stále poměrně vysokém měrném výkonu kolem $100 \text{ lm}/\text{W}$. Při dosažení kompromisu mezi těmito dvěma parametry nám zůstávají jako negativa teplotní závislost, u výkonnějších diod mohutné chlazení a především cena. Ta neustále klesá, protože s rozrůstající se výrobou klesají náklady, ovšem momentálně jsou LED v porovnání s konvenčními zdroji světla stále ještě drahé.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MUSIL, V., *Elektronické součástky*, 3. uprav. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 222 s. ISBN 80-214-1776-5.
- [2] TKOTZ, K. *Příručka pro elektrotechnika*. 2. dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006, 623 s. ISBN 80-867-0613-3.
- [3] DRÁPELA, J., KURSA, M., *Elektrotechnické materiály*, Ostrava VŠB, 2012, 439 s
- [4] HABEL, J. A KOL., *Světelná technika a osvětlování*, FCC Public, Praha 2013, 624 s, ISBN 987-80-86534-21-3
- [5] BAXANT, P., *Zdroje LED v osvětlovací technice*, Electro, 2011. Dostupné z http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=43492
- [6] PEDDINTI, V. K., *Light Emitting Diodes (LEDs)*, University of Rhode Island, 2008, 14 s
- [7] SCHUBERT, E. Fred, *Light-Emitting Diodes*, second edition, Cambridge, 2006, 434 s, ISBN 05-218-6538-7.
- [8] WIKIPEDIA, *Znázornění spektra s barevnou teplotou*, Wikimedia Foundation, 2001, Dostupné z http://cs.wikipedia.org/wiki/Barevn%C3%A1_tepnota#mediaviewer/File:Color_temperature.svg
- [9] ELECTRONICTUTORIALS, *Light Emitting Diode (LED) Schematic symbol and I-V Characteristics Curves*, 2014. Dostupné z http://www.electronicstutorials.ws/diode/diode_8.html
- [10] HUBER, R., STICH, A., *Thermal Management of Light Sources Based on SMD LEDs*, OSRAM Opto Semiconductors GmbH, 2013
- [11] TODOROV, D. G., KAPISAZOV, L. G., *LED Thermal Management*, Technical University of Sofia, 2008, 6 s
- [12] POPPE, M., LASANCE, J.M., *On the Standardization of Thermal Characterization of LEDs*, 25th IEEE SEMI-THERM Symposium, 2009, 8 s
- [13] LASANCE, C., POPPE, A., *Thermal management for LED applications*. New York, NY: Springer New York, 2013. ISBN 978-146-1450-917.
- [14] KEEPING, S., *Thermal effects in white LED chromaticity*, Hearst Electronic Products, 2013, Dostupné z <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/may/thermal-effects-on-white-led-chromaticity>
- [15] U.S.DEPARTMENT OF ENERGY, *Solid-State Lighting technology fact sheet*, Building technologies program, 2013, 4 s
- [16] LEIBSON, S., *How to dim a LED*, Hearst Electronic Products, 2011, Dostupné z <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2010/apr/how-to-dim-an-led>
- [17] CREE, *Thermal management of CREE XLamp LEDs*, Cree Inc., 2014, 21 s, Dostupné z http://www.cree.com/xlamp_app_notes/thermal_management
- [18] POLYTECHNIC HUB, *What is LED light?*, Polytechnic Hub Electronics Articles, 2014, Dostupné z <http://www.polytechnichub.com/what-is-led-light/>
- [19] CREE, *XLamp XR-E*, Cree.com/products, Dostupné z <http://www.cree.com/LED-Components-and-Modules/Products/XLamp/Discrete-Directional/XLamp-XRE>

- [20] LI, J., WANG, J., LIU, Z., POPPE, A., *Solid-State Physics Fundamentals of LED*, Springer, 2014, 11 s, ISBN 978-1-4614-5090-0
- [21] ANDĚL, V., *Osvětlení LED moduly*, VAELEKTRONIK, Dostupné z http://vaelektronik.cz/led_uvod.html
- [22] HUSTON, R., *Ceramic LED lights*, Lightning.com, 2012, Dostupné z <http://lighting.com/ceramic-led-lights/>
- [23] CREE, Avoidance of Ceramic-Substrate-Based LED chip cracking induced by PCB bending or flexing, 2012, 8 s, Dostupné z http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLamp%20Application%20Notes/LED_Chip_Cracking
- [24] PHOTON STAR, *How LEDs produce white light*, PhotonStarTechnology Ltd., Dostupné z http://www.photonstartechnology.com/learn/how_leds_produce_white_light
- [25] DAVIDSON, M., W., *Fundamental of white LEDs*, Carl Zeiss Microscopy Online Campus, <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/print/lightsources/leds-print.html>
- [26] LED TECHINFO, *Rekordy na poli výkonných LED*, ledmania.cz, 2014, Dostupné z <http://www.ledmania.cz/led-techinfo>
- [27] SEOUL SEMICONDUCTOR, *SAW8KG0B datasheet*, Acrich MJT series, Dostupné z http://www.seoulsemicon.com/AcrichNewWave/acrich1_en.asp#con03
- [28] OSRAM, *LED Fundamentals – Thermal Characteristics of LEDs*, OSRAM Opto Semiconductors, 2011, 12 s, Dostupné z http://ledlight.osram-os.com/wp-content/uploads/2013/01/OSRAM-OS_LED-FUNDAMENTALS_Thermal-Characteristics-of-LEDs_v2_08-16-11_SCRIPT.pdf
- [29] OSVĚTLE.CZ, *Světelně technické parametry*, Základy osvětlení, Dostupné z <http://www.osvetle.cz/index.php/23-zaklady-osvetleni/svetelne-technicke-veliciny/184-svetelne-technicke-parametry?showall=&start=1>
- [30] LED PROFESSIONAL, *White Light LEDs*, Luger Research, 2008, 5 s, Dostupné z http://www.instrumentsystems.com/fileadmin/editors/downloads/Products/LpR10_Instrument_Systems_web.pdf
- [31] OSRAM, *Electrical Characteristics of LEDs*, OSRAM Opto Semiconductors, 2012, 16 s, Dostupné z http://ledlight.osram-os.com/wp-content/uploads/2013/01/OSRAM-OS_LED-FUNDAMENTALS_Electrical-Characteristics-of-LEDs_v1_03-07-11_SCRIPT.pdf
- [32] GME, *LED WHITE 1W 140lm/120° HEXAGON*, Dostupné z <http://www.gme.cz/led-white-1w-140lm-120-hexagon-p518-176>
- [33] GME, *katalog LED WHITE 1W 140lm/120° HEXAGON*, Dostupné z <http://www.gme.cz/img/cache/doc/518/176/led-vykonova-white-1w-140lm-120-hexagon-pcb-datasheet-1.pdf>