

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 PŘECHODU NA PROVOZNÍ PARAMETRY A ŽIVOTNOST VÝKONNÝCH MODULŮ LED

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MILAN ZEMAN

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Milan Zeman

ID: 119685

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TĚMATU:

Vliv teploty přechodu na provozní parametry a životnost výkonných modulů LED

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše dostupné literatury - provozní parametry dosahované u dnešních LED
2. Dělení provozních parametrů u LED
3. Životnost a degradace PN přechodu LED
4. Extrémní zatěžování LED
5. Praktické měření provozních parametrů v laboratořích světelné techniky a další ověřování na laboratorních přípravcích

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Michal Krbal

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:

ZEMAN, M. *Vliv teploty přechodu na provozní parametry a životnost výkonných modulů LED*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Krbal.

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalovi Krbalovi za poskytnuté materiály při řešení problémů, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

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.

V Brně dne

Podpis autora



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Bakalářská práce

Vliv teploty přechodu na provozní parametry a životnost výkonných modulů LED

Milan Zeman

**vedoucí: Ing. Michal Krbal
Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2012**

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

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

Bachelor's Thesis

Temperature dependence PN junction on operation parameters and lifetime of high powered LED modules

by
Milan Zeman

**Supervisor: Ing. Michal Krbal
Brno University of Technology, 2012**

Brno

ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je seznámení se změnou provozních parametrů a životností LED modulu. Úvodní část práce je věnována principu vzniku světla, vývoji a využití LED. Hlavní důraz je kladen na degradaci PN přechodu vlivem teploty a životnost celého LED modulu. Praktická část práce obsahuje měření LED diody Cree XLamp XR-E při teplotách od 0°C do 90°C v proudovém rozsahu 0-300% jmenovité hodnoty. Efektivnost provozu LED je velmi závislá na teplotě PN přechodu a při napájení LED přibližně 65% jmenovité hodnoty proudu je přeměna elektrické energie na světelnou nejefektivnější. Záleží na teplotě přechodu, protože se zvyšující se teplotou klesá účinnost. Velmi důležitým faktorem při návrhu osvětlovací soustavy je chlazení, které pomáhá lépe odvádět teplo z čipu.

KLÍČOVÁ SLOVA: LED; teplota; provozní vlastnosti, teplota PN přechodu

ABSTRACT

The aim of this bachelor's thesis is the introduction of changes in operating parameters and lifetime period of LED module. The theoretical part is dedicated to a principle of light, the development and use of LED. The main emphasis is placed on PN junction degradation due to temperature and lifetime period of the LED module. The practical part of this thesis contains measuring of LED diode Cree XLamp XR-E in the course of temperature from 0°C to 90°C in the current range of 0-300% of nominal value. Efficiency of LED operation is highly dependent on PN junction temperature. When powering the LED to approximately 65% of the rated power, the conversion of electric energy to light is the most efficient. It depends on junction temperature because increasing temperature decreases efficiency. A very important factor when designing the lighting system is cooling which helps to dissipate heat from the chip.

KEY WORDS: LED; temperature; operation parameters, PN junction temperature

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	2
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	3
1 ÚVOD	4
2 OBECNÝ POPIS LED	5
3 PRINCIP FUNKCE	6
3.1 POLOVODIČE S VLASTNÍ VODIVOSTÍ.....	6
3.2 POLOVODIČE S NEVLASTNÍ VODIVOSTÍ	7
3.2.1 POLOVODIČ S NEVLASTNÍ VODIVOSTÍ TYPU N	7
3.2.2 POLOVODIČ S NEVLASTNÍ VODIVOSTÍ TYPU P	7
3.3 PN PŘECHOD	8
3.4 VZNIK SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ U LED.....	8
4 VÝVOJ LED	10
4.1 VZNIK BÍLÉ LED	10
4.2 VYUŽITÍ BÍLÝCH LED	11
4.3 ZÁKLADNÍ MĚRITELNÉ VELIČINY	13
4.4 ÚČINNOST LED	14
4.5 VÝHODY POUŽÍVÁNÍ LED ZDROJŮ	15
5 DEGRADACE PN PŘECHODU	16
5.1 ÚČINNOST PŘEMĚNY ENERGIE S VLIVEM TEPLoty.....	16
5.2 ČASOVÁ DEGRADACE PN PŘECHODU S VLIVEM JEHO TEPLoty	17
5.3 VLIV VNITŘNÍCH KOMPONENTŮ NA ŽIVOTNOST LED MODULU	17
5.4 CHLAZENÍ LED MODULU	18
5.5 ZMĚNA PARAMETRŮ LED MODULU.....	19
6 TEPELNÝ MENAGMENT	20
6.1 TEPELNÝ ODPOR ZAPOUZDŘENÉ SOUČÁSTKY	21
7 MĚŘENÍ PARAMETRŮ LED	23
7.1 TESTOVANÁ LED – CREE XLAMP XP-E.....	24
7.2 ZPRACOVANÉ HODNOTY MĚŘENÍ	25
7.3 EXTRÉMNÍ PODMÍNKY MĚŘENÍ.....	30
8 ZÁVĚR.....	32
LITERATURA	33

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek č. 3.1: Pohyb valenčního elektronu a vznik děr [3]</i>	6
<i>Obrázek č. 3.2.1: Polovodič s nevlastní (elektronovou) vodivostí typu N [3]</i>	7
<i>Obrázek č. 3.3.1: Polovodič s nevlastní (děrovou) vodivostí typu P[3]</i>	7
<i>Obrázek č. 3.4: Vytvoření PN přechodu a hradlové oblasti[4]</i>	8
<i>Obrázek č. 3.5: Princip fotonického převodu energie elektronů na fotony[2]</i>	9
<i>Obrázek č. 4.1: Míchání barev RGB[11]</i>	10
<i>Obrázek č. 4.2: Emisní spektrum bílé LED (luminofor buzený světlem modré diody) [1]</i>	11
<i>Obrázek č. 4.3: LED úsporná žárovka [10]</i>	11
<i>Obrázek č. 4.4: Smotaný LED pásek (nahore) a jeho detail</i>	12
<i>Obrázek č. 4.5: Spektrum bílého světla</i>	13
<i>Obrázek č. 4.6: Výkonový LED čip od firmy Cree [9]</i>	14
<i>Obrázek č. 5.1: Pokles světelného toku LED diody vlivem teploty [1]</i>	17
<i>Obrázek č. 5.2: LED modul s chladičem (čip Cree XR-E 5 x 1W)[8]</i>	18
<i>Obrázek č. 5.3 :Křížová charakteristika LED v závislosti na proudu [5]</i>	19
<i>Obrázek č. 6.1: Naznačení tepelného odporu LED modulu</i>	21
<i>Obrázek č. 6.2: Model tepelného odporu zapouzdřené součástky</i>	22
<i>Obrázek č. 6.3: Nahrazení dílčích tepelných odporů jediným prvkem</i>	22
<i>Obrázek č. 7.1: Zjednodušený model části měřicího zařízení</i>	23
<i>Obrázek č. 7.2: CREE XP-E a jeho rozměry [14]</i>	24
<i>Obrázek č. 7.3: Závislost napětí na procházejícím proudu</i>	25
<i>Obrázek č. 7.4 : Závislost napětí na procházejícím proudu</i>	25
<i>Obrázek č. 7.5.: Závislost příkonu na procházejícím proudu</i>	26
<i>Obrázek č. 7.6: Závislost příkonu na procházejícím proudu</i>	26
<i>Obrázek č. 7.7: Závislost příkonu na procházejícím proudu</i>	27
<i>Obrázek č. 7.8: Křížové charakteristiky LED při 20°C a 90°</i>	28
<i>Obrázek č. 7.9: Křížové charakteristiky LED při 20°C a -5°C</i>	29
<i>Obrázek č. 7.10: Naznačení měření nízkých teplot provozu LED</i>	31

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

LED	dioda emitující světlo – light-emitting diode
RGB	red-green-blue
SMD	součástka pro povrchovou montáž – surface mount device
U	napětí
R _a	index barevného podání
Φ	světelný tok
I	svítivost
η	měrný výkon

1 ÚVOD

Zadáním této bakalářské práce je seznámit se s problematikou změny provozních parametrů LED modulu, jeho životnosti a měření těchto parametrů ovlivněných teplotou přechodu. V první řadě se seznámíme se základní strukturou polovodičů, PN přechodu a vzniku světla u LED diod.

Další fáze spočívá ve vývoji LED. Vytvoření světelné diody emitující bílé světlo mělo za následek obrovské spektrum využití a jsou zde uvedeny jedny z hlavních výhod těchto světelných zdrojů. V dnešní době jsou LED jedním z nejrychleji rozvíjející se odvětví světelné techniky.

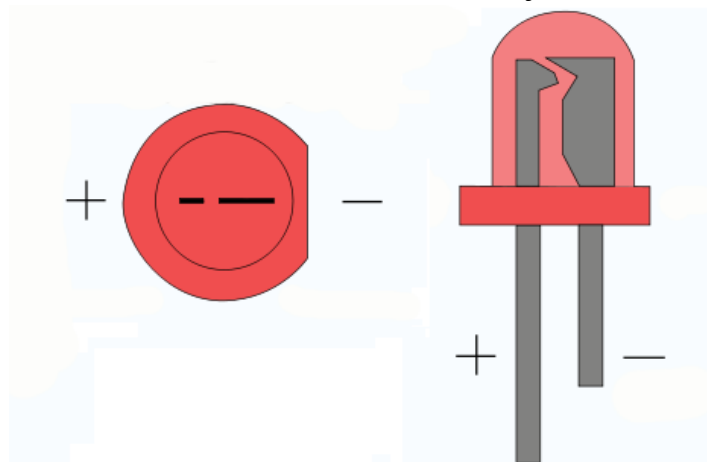
Následujícím bodem práce je vliv teploty PN přechodu na změnu provozních vlastností a celkové životnosti LED modulů. Ty dnes dosahují účinností mnohokrát vyšší než u konvečních žárovek, které většinu svoji energie produkují ve formě tepelné. Větší výkony u LED jsou podmíněny dodatečným chlazením, neboť LED sama o sobě není schopna vyprodukované teplo odevzdat do okolí a tím se zhoršují její světelné parametry. Teplota má vliv také na životnost a je tedy nutné dostatečně dimenzovat chladicí prvky světelných modulů.

Závěrečný bod práce se zabývá problematikou měření čipu světelné diody Cree XLamp XR-E a vyhodnocením výsledků z měření ve formě grafických závislostí v absolutních, tak relativních hodnotách vztažených k nominální hodnotě proudu při 20°C.

2 OBECNÝ POPIS LED

LED diody, jak jejich překlad Light-Emitting Diode říká, jsou polovodičové součástky vyzařující určité spektrum, jak viditelné, tak například ultrafialové, které je pro oko člověka mimo viditelnou oblast. Obsahují PN přechod a fungují na podobném principu jako klasické diody – prochází-li nimi proud v propustném směru, tak emitují světlo.

Jejich vznik se datuje od 60. let 20. století a jejich největším využitím přibližně do počátku 21. století byla funkce kontrolky a různých signalizačních nebo informačních činností například ve formě displejů. Potřeba malé hodnoty proudu je pasovala téměř do každého elektronického zařízení – můžeme je najít jako indikátory vypnutí/zapnutí televizorů, videí apod. Postupem času si „LEDky“, jak jim je lidově říkáno, našly cestu do širšího spektra použití a v poslední době se dostávají i do domácností ve formě osvětlovací techniky, kde nestačí pouze výkony v řádech jednotek mW ale jako náhrada za klasické žárovky právě přicházejí moduly s výkonem jednotek Wattů. Chceme-li nahradit právě zmíněné žárovky, musíme si uvědomit podstatu funkce LED diody, u kterých musíme dbát na jejich zapojení – klasické žárovky pracují na střídavé napětí a nezáleží tedy na polaritě zapojení, kdežto LED diody pracují na principu stejnosměrného napětí a je tedy důležité, aby bylo na jejich elektrodách zapojená správná polarita napětí. V praxi to tedy znamená, že kladná polarita musí být připojena na anodu a záporná polarita na katodu, tímto je základní podmínka splněna a dioda je po připojení na napájecí zdroj v propustném stavu. Opačným stavem je zapojení v závěrném směru, kdy může dojít až ke zničení celého prvku a to takovým způsobem, že napětí na P-N přechodu překročí hranici tzv. průrazného napětí a dojde k narušení či zničení P-N přechodu. Proto je velice důležité správné zapojení těchto polovodičových součástek do obvodu a je tedy nutné si v katalogovém listu zjistit polaritu vývodů. Na obrázku č. 2.1 je naznačen půdorys a bokorys klasické LED diody, kde „+“ je anoda a „-“ katoda. Existují i speciální LED diody, které fungují i na střídavé napětí, kde jejich činnost vychází z periodického rozsvěcování a zhasínání s frekvencí zdroje střídavého napětí.

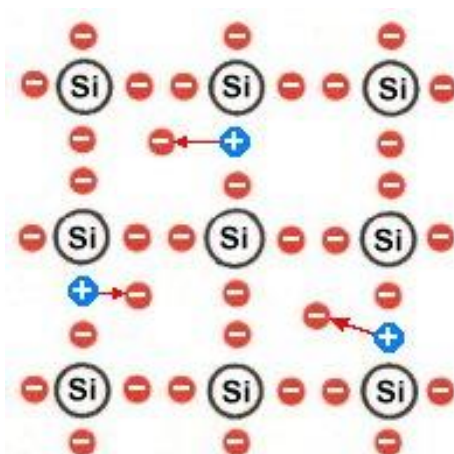


Obrázek č. 3.1: Vývody klasické LED diody

3 PRINCIP FUNKCE

3.1 Polovodiče s vlastní vodivostí

LED dioda patří do skupiny polovodičů, které mají odlišné vlastnosti vzhledem k okolním vlivům a svoji rezistivitou zapadají mezi vodiče a izolanty. Jejich záporný teplotní součinitel odporu způsobuje, že konduktivita s teplotou vzrůstá. Nejvýznamnějšími polovodiči jsou křemík, germanium, selen, arzen a další. Jejich elektrické vlastnosti se určují podle vlastností krystalové mřížky. Například křemík má 4 valenční elektrony, jedná se tedy o tzv. čtyřmocný prvek, a jeho atomy jsou uspořádány v krystalové mřížce. Při nízkých teplotách je mřížka takřka stabilní ale při dodání energie (světelné či tepelné) atomy tuto energii přemění na pohybovou, dojde k přerušení kovalentních vazeb mezi atomy, některé valenční elektrony získají potřebnou energii pro překonání zakázaného pásma a přeskočí z valenčního do vodivostního pásma. Místo, ze kterého elektron „přeskočí“ z jednoho pásma do druhého je označováno jako díra a jedná se tedy o místo, kde je nedostatek záporného náboje. Jelikož se jedná o kladně nabitou částici, tak na její místo může vyplnit jiný elektron z krystalové mřížky. Tomuto procesu se říká rekombinace. Na obrázku č. 3.1 je pohyb valenčního elektronu označen šipkou a díra modře. Čím více je tomuto prvku dodána energie, tím více valenčních elektronů se bude uvolňovat a na jejich místě se bude tvořit více děr. Po připojení napětí se začnou záporné elektrony přesouvat ke kladnému pólu, kladné díry naopak k pólu zápornému a utvoří usměrněný pohyb elektronů. V takovém případě se jedná o vlastní vodivost. [3]



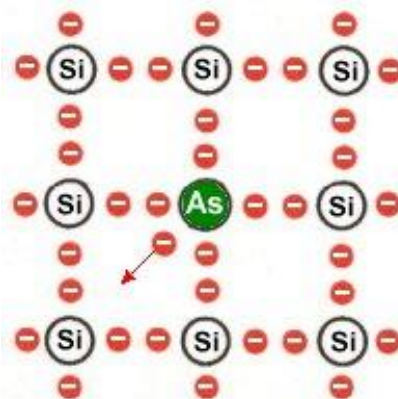
Obrázek č 3.1: Pohyb valenčního elektronů a vznik děr [3]

Vzhledem k tomu, že jsou vlastnosti polovodičů velmi závislé na čistotě prvku, tak přidáním různých příměsí se vytvoří polovodiče s nevlastní vodivostí. Vhodným výběrem příměsí lze docílit toho, aby byl elektrický proud veden buď volnými elektrony (nevlastní vodivost typu N) nebo děrami (nevlastní vodivost typu P).

3.2 Polovodiče s nevlastní vodivostí

3.2.1 Polovodič s nevlastní vodivostí typu N

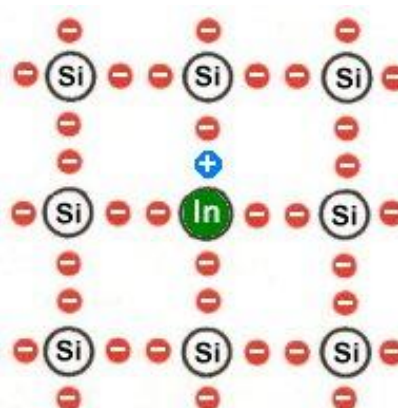
Přidáním pětímocného prvku (například arzen) do čtyřmocného křemíku způsobí, že 4 valenční elektrony obou prvků se účastní vazeb, ale pátý u arzenu je jen slabě vázán a nízké teploty způsobí úplné odtržení elektronu z vazby a stává se z něj volný elektron. Každý atom arzenu tedy zapříčiní vznik jednoho elektronu, ale žádné díry. Výsledný polovodič má tedy více elektronů než děr a nazývá se polovodičem s elektronovou vodivostí neboli polovodičem typu N (N=negative). Na obrázku č. 3.2.1 je situace naznačena v krystalové mřížce, kde je u atomu arzenu naznačen vznik volného elektronu. [3]



Obrázek č. 3.2.1: Polovodič s nevlastní (elektronovou) vodivostí typu N [3]

3.2.2 Polovodič s nevlastní vodivostí typu P

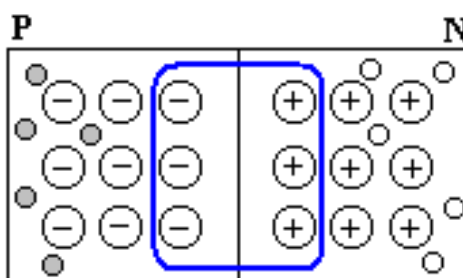
Opačným způsobem vznikají polovodiče typu P. Tedy do krystalové mřížky čtyřmocného křemíku je přidán prvek trojmocný (například indium). Jeho tři valenční elektrony se účastní vazeb se sousedními atomy křemíku a chybějící čtvrtý elektron nenasyčením vazby způsobí vznik díry, tedy náboje s kladným nábojem. Díra může být „vyplněna“ elektronem a přesouvat se v krystalové mřížce. Přidáním trojmocné příměsi do polovodiče vznikne nadbytek děr a jedná se o děrovou vodivost neboli nevlastní vodivost typu P (P=positive). Na obrázku č. 3.3.1 je situace naznačena v krystalové mřížce, kde u atomu india vzniká díra (chybí valenční elektron). [3]



Obrázek č. 3.3.1: Polovodič s nevlastní (děrovou) vodivostí typu P[3]

3.3 PN přechod

Jakmile se polovodič typu P a N spojí, vznikne mezi nimi PN přechod. Jedná se o oblast, ve které pronikají elektrony do části P a díry do části N a vzájemně rekombinují. Tímto způsobem volné částice s nábojem mizí z oblasti přechodu a začíná se projevovat difuzní elektrické pole vytvářené ionty příměsí. Další elektrony a díry se nemohou dostávat k přechodu, neboť jim v tom brání vytvořené elektrické pole. Oblast u přechodu, která neobsahuje volné částice s nábojem, se nazývá hradlová vrstva. Na obrázku č. 3.4 je vzniklá situace znázorněna. Velikost této vrstvy se mění zapojením. V propustném směru (tj. kladná polarita napětí na P, záporná na N) je hradlová vrstva podstatně menší a proud je veden majoritními nosiči. Druhým způsobem zapojení je v závěrném směru (tj. kladná polarita na N a záporná na P). V takovém případě se působením elektrických sil oddalují volné náboje od přechodu PN a vedení proudu se účastní pouze minoritní nosiče, takže výsledný proud je minimální. [3][4]



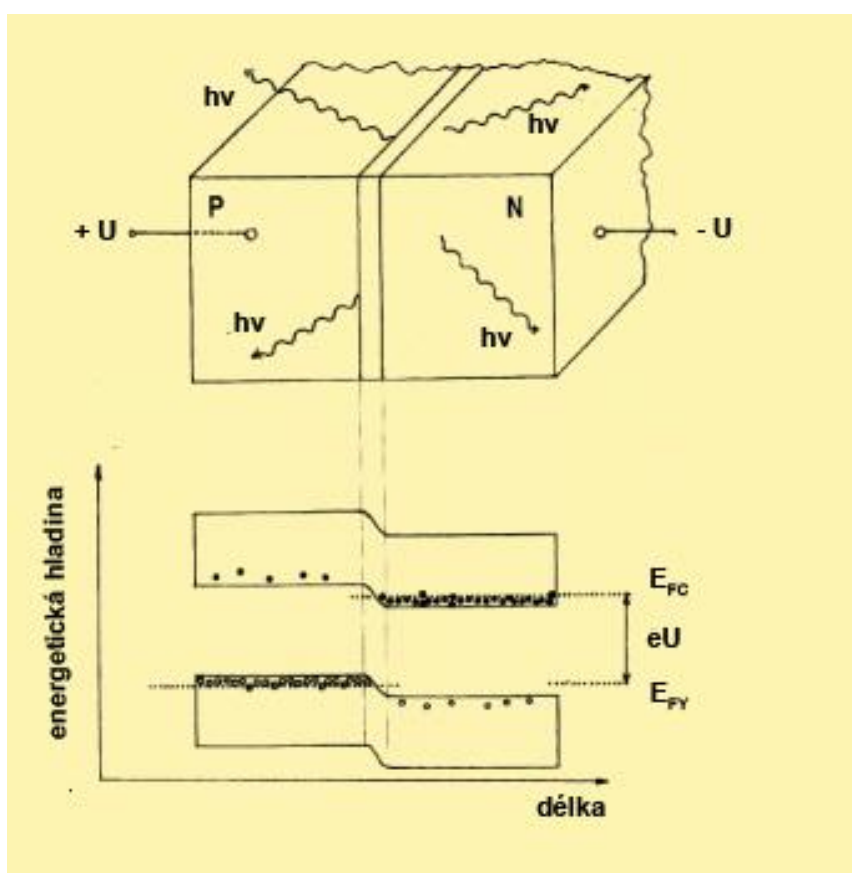
Obrázek č. 3.4: Vytvoření PN přechodu a hradlové oblasti (modře)[4]

3.4 Vznik světelného záření u LED

„Po připojení napětí U k přechodu PN v propustném směru se Fermiho hladina rozštěpí na kvazi-Fermiho hladiny E_{Fc} a E_{Fv} , které jsou od sebe posunuty o energetický rozdíl eU . Tato energie je k dispozici při tzv. zářivé rekombinaci elektronů a děr. Připojení napětí totiž způsobí, že elektrony z typu N přecházejí do typu P a díry naopak (tzv. injekce nosičů) a obojí nosiče se ve velkém množství hromadí v blízkosti přechodu. To jsou výhodné podmínky pro vznik zářivé rekombinace, kdy elektrony svou energii předávají fotonům vznikajícího záření“. [2]

„Princip využití fotonického převodu energie z elektronů na fotony u LED si lze objasnit na obr. 3.5. Zde je zjednodušené konstrukční uspořádání elektroluminiscenční diody LED. Je tvořena polovodičovým přechodem PN, připojeným ke zdroji elektrického proudu v propustném směru, který dodává elektrickou energii, využívanou pro vznik energie zářivé, tj. fotonů. Přechod P-N má za tmy a v tepelné rovnováze polohu Fermiho hladiny společnou. Elektrický proud procházející přechodem za rovnovážných podmínek je určen algebraickým součtem rovnovážných toků nosičů náboje, které za časovou jednotku dopadají na přechod, vynásobený nábojem elektronu. Za rovnováhy jsou součty elektronových i děrových proudů procházejících přechodem nulové“. [2]

„Jakmile se k přechodu připojí elektrické napětí, změní se poloha Fermiho hladiny na obou stranách přechodu do polohy dvou kvazi-Fermiho hladin a začne vhánění děr ze strany P a vhánění elektronů ze strany N do společné oblasti přechodu. Tím jsou ovšem porušeny dosavadní rovnovážné podmínky a nastává intenzivní rekombinace elektronů a děr, při níž se energie nosičů elektrického náboje, rovnající se energetické vzdálenosti kvazi-Fermiho hladin, následkem přechodu přes zakázaný pás mění na energii vznikajícího záření, reprezentovaného fotony. Tento ukázkový proces fotonické přeměny energie se často nazývá injekční elektroluminiscence a neuplatňuje se u jakéhokoliv přechodu PN. Je nutné splnit mnoho podmínek ohledně dotace, teploty, koncentrace defektů v materiálech, existence tzv. přímého zakázaného pásu a rekombinačních center atd.“ [2]



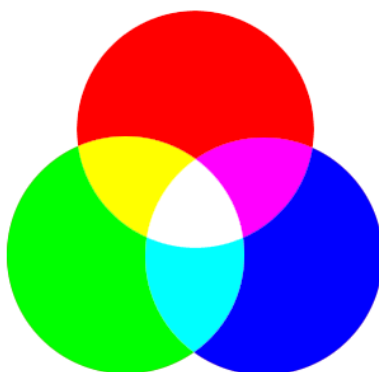
Obrázek č. 3.5: Princip fotonického převodu energie elektronů na fotony[2]

4 VÝVOJ LED

První diody vyzařovaly světlo červené a po nich se začínaly objevovat zelené, oranžové, žluté a v poslední řadě modré barvy. Všechny tyto typy se vyznačovaly velmi úzkou křivkou spektrálního složení, která se pohybovala ve vlnových délkách do desítek nanometrů. Právě vyrobení diody modré barvy mělo za následek masivní nárůst využití LED diod do domácností a průmyslu. Postupně byly objeveny dva způsoby jak z modré světlo transformovat na bílé.

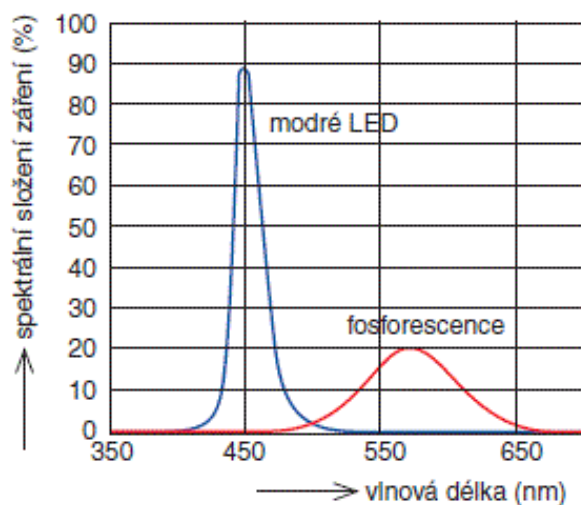
4.1 Vznik bílé LED

Prvním způsobem je míchání třech základních barev – červené, zelené a modré (z anglického překladu Red-Green-Blue je vyvozena zkratka RGB). V počátku byl tento způsob téměř dokonalý, protože mícháním všech barev bylo možné pokrýt celé barevné spektrum, ale problém spočívá v tom, že takovýto modul se skládal ze tří diod a postupem času se měnily vlastnosti jednotlivých prvků a modul poté ztrácel vlastnosti ve vyzařování určité barvy. Na obrázku č. 4.1 je princip míchání barev naznačen.



Obrázek č. 4.1: Míchání barev RGB[11]

Druhý způsob využíval specifické vlastnosti luminoforu-fosforescenci. V podstatě jde o to, že záření o určité vlnové délce (odpovídající modrému až UV světlu) dopadá na luminofor, který následně vyzáří oku viditelné světlo. Na obrázku č. 4.2 je princip buzení luminoforu světlem modré LED, kde je patrné zvětšení šířky pásma vyzařování, ale za cenu snížení spektrálního složení záření. Hlavní výhodou oproti míchání barev RGB je větší účinnost a co bylo nejdůležitější pro další vývoj, tak celková velikost čipu je menší-není už potřeba třech diod.



Obrázek č. 4.2: Emisní spektrum bílé LED (luminofor buzený světlem modré diody) [1]

4.2 Využití bílých LED

Objevení bílých LED odstartovalo obrovský skok kupředu ve vývoji a v posledních letech se jedná o jedno z nejrychleji se rozvíjejících odvětví osvětlovací techniky. „Zastaralé“ žárovky a kompaktní zářivky budou touto technologií postupně vytlačovány. S nadsázkou lze mluvit o LED světelných zdrojích jako o světle budoucnosti.

Prvním krokem byly LED úsporné žárovky, ve kterých byla implantována až stovka LED diod jako náhrada za klasické žárovky (na obrázku č. 4.3 je LED žárovka se 132 LED diodami). Svůj účel splňovaly v prostorech, kde nebylo zapotřebí velká intenzita světla ale oproti tomu neustálé svícení. Hlavní výhodou byla zajisté malá spotřeba, jenže svítivost takového celku byla velkým mínusem. Tato možnost nebyla schopna nahradit většinu konvečních zdrojů světla.



Obrázek č. 4.3: LED úsporná žárovka [10]

Vývoj šel kupředu a přišly na řadu tzv. vysoce výkonné čipy (high power chip). Vynikají hlavně malými rozměry, vyšší svítivostí a vyrábějí se i ve formě SMD součástek. Od počátku vývoje plocha takovýchto čipů rostla od $0,5 \text{ mm}^2$ až po jednotky milimetrů čtverečných a s tím také rostly proudy protékající LED (resp. příkony). Časem bylo možné dosáhnout proudů v rámci desítek mA, přičemž světelný tok dosahoval až desítek lm.

Velikost čipu dovoluje výrobcům širokou škálu možností jak vyrobit určitý druh světelného zdroje a v poslední době jsou stále více oblíbené LED pásy. Skládají se z mnoha samostatně fungujících celků, které se často dají zkrátit na požadovanou velikost (většinou po 3 čípech tvořících jeden modul). Tato vlastnost představuje vysokou individualizaci při návrhu osvětlení. Šířka takového pásu nepřekračuje jednotku centimetru a výška v řádech milimetrů dovolují použití v téměř každém prostoru (obrázek č. 4.4 ukazuje konkrétní pásek tvořený LED diodami). Zajímavou možností jsou LED pásy tvořené RGB čipy, se kterými pomocí ovládacího modulu lze vytvářet nekonečné kombinace efektů (prolínání barev, snižování jasu atd.).

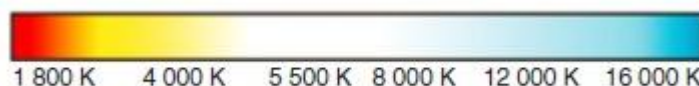


Obrázek č. 4.4: *Smotaný LED pásek (nahore) a jeho detail (dole)*

4.3 Základní měřitelné veličiny

Každý světelný zdroj má své specifické vlastnosti, které jsou měřitelné. Jsou zde vybrány základní veličiny, mezi které patří:

- Index barevného podání – R_a
 - bezrozměrná jednotka, nabývá hodnot 0-100 ($R_a=100$ znamená, že vjem barev odpovídá přirozenému podání a při $R_a=0$ není možné rozeznat osvětlením barvu);
 - je hodnocení věrnosti barevného vjemu, který vznikne osvětlením ze světelného zdroje v porovnání s tím, jaký barevný vjem by vznikl ve světle referenčního ideálního zdroje[7];
- Teplota chromatičnosti
 - jednotka: K (Kelvin) ;
 - světlo určité barevné teploty má barvu tepelného záření vydávané černým tělesem, zahřátým na onu teplotu;
 - charakterizuje spektrum bílého světla (uvedeno na obr. č. 4.5);



Obrázek č. 4.5: Spektrum bílého světla

- Světelný tok – Φ
 - jednotka: lm (lumen);
 - označuje světelnou energii, kterou zdroj vyžáří za 1 sekundu;
- Svítivost – I
 - jednotka: cd (kandela);
 - udává hustotu světelného toku zdroje vyzařeného do prostoru;
- Měrný výkon – η
 - jednotka: lm/W
 - udává hospodárnost dodané energie (příkonu) na přeměnu ve světelnou;
- Technický život světelného zdroje
 - jednotka: h (hodina);
 - jedná se o dobu, při které světelný tok zdroje klesne na poloviční hodnotu;

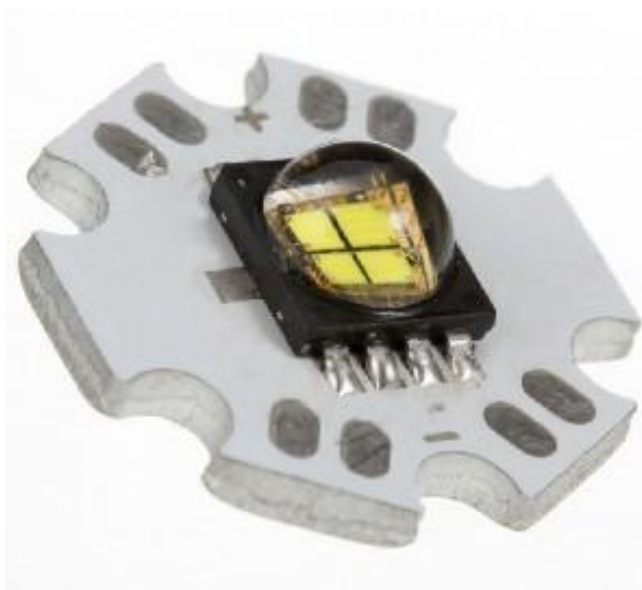
4.4 Účinnost LED

Abychom mohli porovnávat účinnosti jednotlivých modulů, tak uvádíme tzv. měrný výkon (viz. kapitola 3.3). Jedná se o poměr světelného toku ku dodané energii.

V dnešní době jsou nejvíce rozšířené čipy s měrným výkonem okolo 60 lm/W a to je téměř trojnásobek hodnoty jakou má klasická žárovka. V roce 2009 byla překročena hranice 100 lm/W a tato hodnota ve vývoji určitě není konečná, jelikož v současnosti (2011) se tato hodnota přibližuje hodnotě 150 lm/W a do budoucna by neměl být problém vyrobit čip s 200 lm/W. Jedním z hlavních průkopníků v této oblasti je firma Cree-v laboratorních podmínkách naměřila na svém výrobku 186 lm/W (parametry čipu: 1 W, 350 mA, 4577 K)[6]. Obrázek č. 4.6 ukazuje, jak takový výkonový čip může vypadat.

Výkonnost komerčních LED zatím nepřekročila 50% hodnoty vývojových vzorků. Přestože se totiž 70 % elektrické energie na světlo přemění, většina generovaného světla nikdy neopustí LED z důvodu vnitřního odrazu na rozhraní mezi materiálem s relativně vysokým indexem lomu (především GaN) a okolním materiálem s nižší hodnotou tohoto indexu. Pro větší účinnost, aby se dosáhlo požadované úrovně světelného toku, je třeba použít celou sadu LED. S tím však také roste složitost i cena celého systému a snižuje se jeho spolehlivost. [12]

Snahou výrobců je zvýšit účinnost při zachování stejných rozměrů čipu a to se jeví jako jeden z hlavních problémů dnešní doby, protože je nezbytné řešit aplikaci chlazení, tak aby teplota nepřesáhla limitní teplotu povolenou výrobcem, která záleží na konkrétních modelech modulů (pro představu se jedná o teploty nad 80°C). Překročení této teploty nemusí přímo vést k destrukci LED čipu ale ke snížení životnosti.



Obrázek č. 4.6: Výkonový LED čip od firmy Cree [9]

4.5 Výhody používání LED zdrojů

Výhody používání světelných diod se mohou dělit z pohledů několika hledisek:

a) Geometrické, světelné a elektrické: [1]

- velmi malé rozměry a umožňují nepřebornou škálu výsledných tvarů svítidel;
- vyzářovací charakteristika dovoluje koncentrovat velké množství energie do malého světelného svazku, což je velmi výhodné při přenosu informace;
- svítí v jakékoli poloze;
- bezpečnější než zdroje pracující se síťovým napětím, jelikož pracují s nízkým napětím, takže odpadají ostatní náklady na ochranu před dotykem;
- možnost regulace jasu pomocí napětí a s tím spojená i životnost. Vypínání a zapínání jím na době života neubírá tolik jako například u kompaktních žárovek;
- velmi krátká doba náběhu a rychlá odezva-v rámci nanosekund;
- možnost řadit LED do série k dosažení potřebného světelného toku při malém odběru energie;
- vysoký jas;

b) Provozní a kolorimetrické: [1]

- vysoká spolehlivost a délka života-podle typu se uvádí životnosti od 60 000 do 100 000 hodin při poklesu světelného toku o 30 až 40%. Tato hodnota je silně ovlivněna okolními podmínkami;
- odolnost vůči vibracím a mechanickým vlivům;
- dají se použít v širokém rozmezí teplot, přibližně od -30 do 60°C;
- nepotřebují dodatečnou optiku pro soustředění světelného svazku na určité místo při použití více LED;
- bílé LED s vysokým indexem barevného podání a široká škála teploty chromatičnosti;
- téměř nekonečný počet barevných odstínů, které jsou téměř monochromatické.

5 DEGRADACE PN PŘECHODU

5.1 Účinnost přeměny energie s vlivem teploty

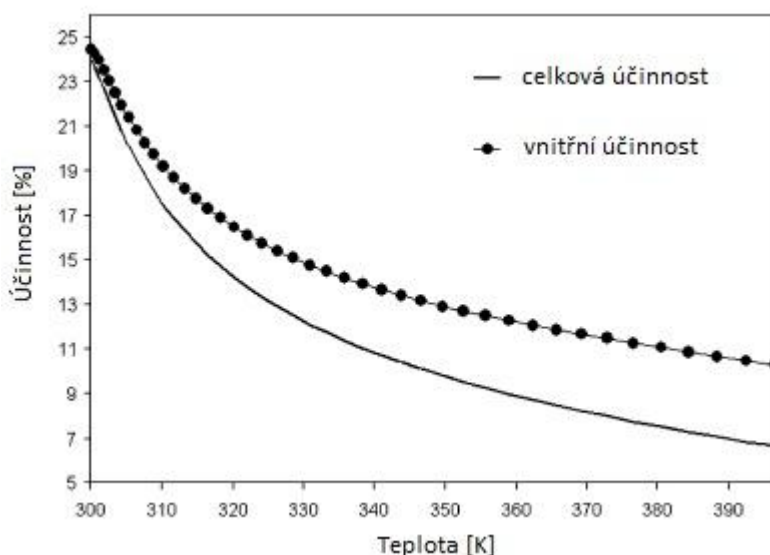
Účinnost přeměny elektrické energie na světelnou je silně závislá na teplotě přechodu a můžeme ji definovat jako:

$$\eta = \frac{P_l}{P_e} \quad (5.1)$$

, kde P_l označuje světelný výkon a P_e elektrickou energii k přeměně tohoto výkonu potřebnou. Závislost účinnosti na teplotě je uvedena na obrázku č. 5.1, kde se efektivita snižuje s rostoucí teplotou. Nahrazení LED diody modelem s určitými prvky je pak vysvětlení této skutečnosti, že při provozování vyššími proudy se výrazná část výkonu ztratí na sériovém odporu $P_e = I^2 \cdot R$, kde R je sériový odpor. Sériový (předřadný) odpor vzniká na P a N části polovodiče a mění se rozšiřováním přechodu diody. Tento ztrátový výkon je způsoben průchodem proudu rozšiřující se vrstvou diody a pro výpočet vnitřní účinnosti se tato hodnota ztrátového výkonu na odporu musí odečíst, aby bylo možné vyčíslit pouze tu část elektrické energie spotřebovanou LED diodou. V takovém případě pro vnitřní účinnost platí:

$$\eta_{in} = \frac{P_l}{P_e - I^2 \cdot R} \quad (5.2)$$

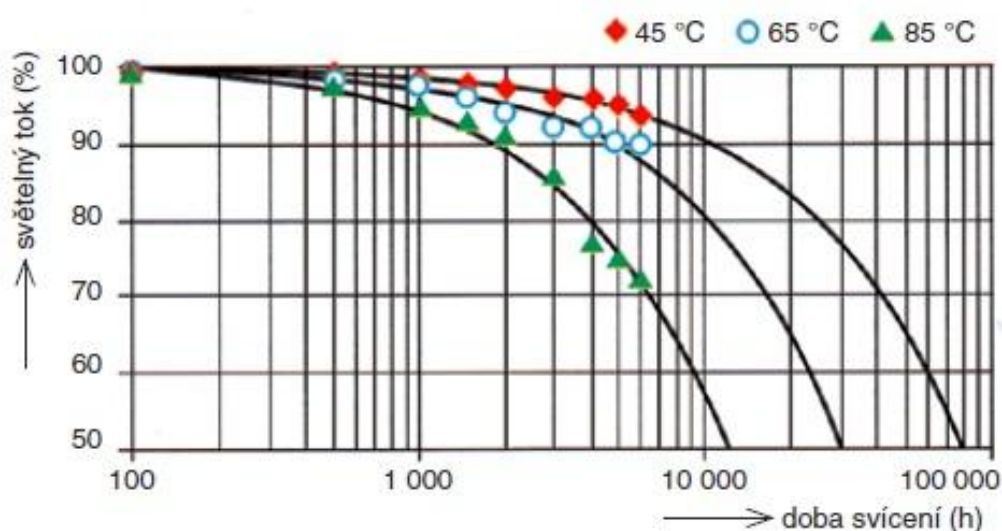
Pokles celkové účinnosti je 72% se vzrůstající teplotou z 25°C na 107°C na přechodu LED. Vnitřní účinnost bez vlivu sériového odporu klesne o 58%, takže 14% účinnosti spadá právě na tepelnou závislost sériového odporu LED. [15]



Obrázek č. 5.1: Závislost účinnosti na teplotě přechodu [15]

5.2 Časová degradace PN přechodu s vlivem jeho teploty

Vlivem času PN přechod ztrácí svoje vlastnosti. Postupem času se začínají prolínat příměsi mezi jednotlivými vrstvami a jedná se tedy o migraci atomů do míst, kde je jich méně. Je to pomalý a velmi zdlouhavý proces. Zvyšující se teplotou narůstá pohyblivost částic, zvětšuje se strmost takové závislosti a migrace atomů má podstatně větší vliv na životnost PN přechodu. Následkem tohoto procesu je pokles světelného toku LED, protože v PN přechodu klesá pravděpodobnost vzniku zářivé rekombinace a zvyšuje se pravděpodobnost rekombinací nezářivých. Na obrázku č. 5.1 je uvedena grafická závislost světelného toku LED diody na čase při různých teplotách, kde provozní teplotě 85°C krátí střední doba životnosti o přibližně 7000 hodin oproti provozu při teplotě 45°C.



Obrázek č. 5.2: Pokles světelného toku LED diody vlivem teploty [1]

5.3 Vliv vnitřních komponentů na životnost LED modulu

Zahřívání samotného LED čipu v celém modulu má za následek i pronikání teploty do ostatních prvků modulu. Jelikož není možné připojit standardní LED zdroje přímo na síťové napětí, tak je zapotřebí k funkci i různých elektronických součástek. Jedna ze součástek, která bude mít největší vliv na životnost celého modulu, je bezesporu elektrolytický kondenzátor, neboť zdroje proudu jsou z větší části zabudovány přímo v těle LED zdroje. Vzhledem k tomu, že je dnes na trhu spousta druhů světelných zdrojů založených na principu LED diod, tak si musí uživatel uvědomit, že spousta levných výrobků pochází od výrobců, kteří používají nekvalitní elektrolytické kondenzátory. Opak toho jsou špičkoví výrobci, jež jsou schopni tyto kondenzátory naddimenzovat a použít u takové, které mají delší dobu životnosti. Koncová cena je v takovém případě několikanásobně vyšší ale kvalita a životnost LED modulu je také na vyšší úrovni, nemluvě o celkové bezpečnosti.

Dalším faktorem při zahřívání je zhoršení kvality luminoforu a tím účinnosti přeměny energie fotonů na světelnou energii. Luminofor pro výkonové čipy je ve formě hmoty srovnatelné například z pryskyřicí (podle použití), která podléhá tepelným účinkům jako každá jiná. Při zvýšené teplotě čipu se proto může odpařovat a měnit svoje vlastnosti. Tento děj je nevratný a proto by teplota neměla přesahovat výrobcí stanovené hodnoty pro dosažení maximální životnosti celého modulu.

5.4 Chlazení LED modulu

Generované teplo se u LED neuvolňuje do prostoru jako u žárovky, ale do materiálu pod diodou (silné zdroje světla do ruky, baterky, vybavené LED jsou toho dobrým důkazem). Proto jsou čipy s LED velmi malé (méně než 1 mm^2), aby jejich svítící povrch byl co nejblíže vlastnímu zdroji světla. [12]

K odstranění zahřívání je nutné použít účinné chlazení. Obecně platí, že při větším příkonu je nutné zajistit větší plochu, která zajistí odvod přeměněné tepelné energie. Proto je potřeba použít chladič (obrázek č. 5.3 ukazuje, jak takový modul s chladičem může vypadat). Pro většinu modulů do příkonu přibližně $1,5 \text{ W}$ není potřeba použití chladiče, neboť pokud je dobře konstruován, vytvořené teplo je schopno vyžářit se povrchem. Vyšší příkony už je nutné chladit a používají se hliníkové bloky s různě vyrobenými žebry. Chladiče se dají tvarovat do všelijakých tvarů, nemusí kazit estetický dojem celého modulu a tím vypadat moderně. Pro náročnější svítidla větších výkonů je potřeba použití aktivního chlazení ventilátorem a případně lepšího materiálu chladiče pro účinnější odvod tepla. Tyto požadavky se poté odrážejí na výsledné ceně osvětlovací soustavy.

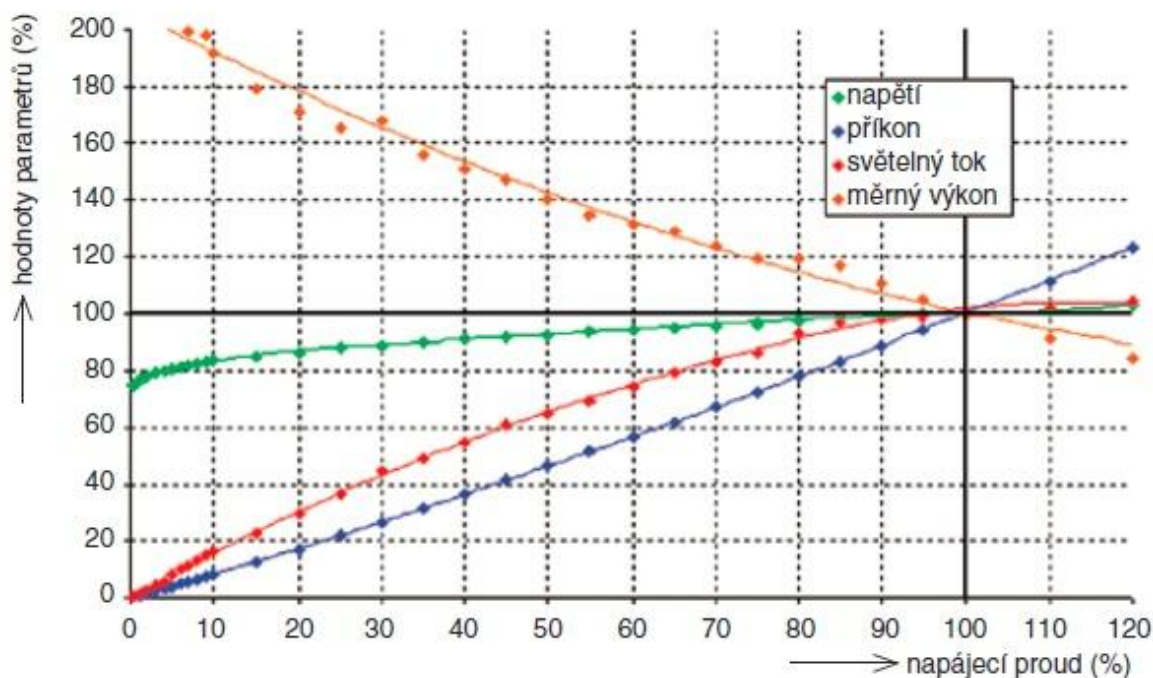


Obrázek č. 5.3: LED modul s chladičem (čip Cree XR-E $5 \times 1 \text{ W}$)[8]

5.5 Změna parametrů LED modulu

Změnou napájecího proudu můžeme simulovat teplotní děje v LED diodě. Když luminiscenční diodu zatížíme větším proudem než jmenovitým, začne se ohřívat. Jak taková situace může vypadat je uvedeno v [5], kde je uvedena křížová charakteristika změřená na světelné diodě od firmy Nichia, typ NGPLR70 (obrázek č. 5.4). Z této křížové charakteristiky je patrné, že při napájení 80% jmenovitého proudu je měrná účinnost přeměny elektrické energie na světlo přibližně 120% (s rostoucím jmenovitým proudem má klesající tendenci). Při 100% jmenovitém proudu pracuje LED i na svoji „pracovní“ teplotu (za předpokladu stálé vnější teplotě, která se nemění). Nad tuto hranici proudu stoupá už jen příkon takové diody a svítivost jen minimálně stoupne nad hranici 100%.

To je důsledkem toho, že měrný výkon od této hodnoty klesá. Tato skutečnost vede k tomu, že při návrhu osvětlení je lepší použít menší jmenovité hodnoty proudu, aby světelná dioda měla jisté rezervy i vůči okolním vlivům (např. teplotě). Proto je vhodné použít více LED modulů s nižším příkonem, protože je lépe zajištěno lepší odvádění tepla a celková účinnost. [5]



Obrázek č. 5.4 :Křížová charakteristika LED v závislosti na proudu [5]

6 TEPELNÝ MENAGMENT

Obecným trendem při vývoji elektronických systémů je jejich miniaturizace projevující se neustálým snižováním rozměrů a nárůstem výkonu. Větší počet funkcí elektronického zařízení je podmíněno zvětšenou hustotou k tomu potřebných součástek, ale také větší množství tepla, které je v jednotce objemu rozptýleno jako ztrátový výkon v určitém čase. Tento ztrátový výkon v podobě tepla je potřeba odvést ze zařízení a případně eliminovat na nejnižší možnou úroveň. Při návrhu elektronického zařízení se musí proto dbát na tepelné vlastnosti, jelikož velkou mírou ovlivňují spolehlivost a výkonnost. [13]

S větším ztrátovým výkonem nastává potřeba lepšího odvodu tepla, kde už nestačí přirozené ochlazování fungující na principu přenosu tepelné energie, mezi které patří:

- *vedení,*
- *proudění,*
- *vyzařování.*

Průchod elektrického proudu systémem, ve kterém se objevují elektronické součástky, má za následek ztráty ve formě tepla (přeměna elektrické energie na tepelnou). V případě chlazení LED modulů (kapitola 5.4) je zásadní vliv na pečlivém odvodu tepla z přechodu do okolí. Provozování takového zařízení při vyšších teplotách přechodu snižuje jeho životnost a má výrazný vliv jeho výstupních parametrů. Snahou výrobců je docílit dokonalého odvodu tepla při normálních podmínkách provozu. Mezi hlavní podmínky při návrhu modulu patří:

- *Nejdůležitějším faktorem pro úspěšný návrh chlazení je minimalizovat množství tepla, které by mělo být odstraněné.*
- *Oddělit řídicí systém LED z čipu, aby jím vytvořené teplo neovlivnilo teplotu přechodu.*
- *Minimalizace okolní teploty uvnitř modulu. Tento cíl je dosažen při vhodném návrhu designu modulu, který svou chladicí schopností nedovolí přesáhnout přípustné hranice uvnitř zařízení. Zásadní je v tomto případě zajištění průchodu vzduchu pro konvekční chlazení.*
- *Zvýšení tepelné vodivosti mezi čipem a chladičem. Přestože teplo z chladiče je odváděno konvencí, cesta přenosu tepla mezi čipem a chladičem závisí na kondukcii.*

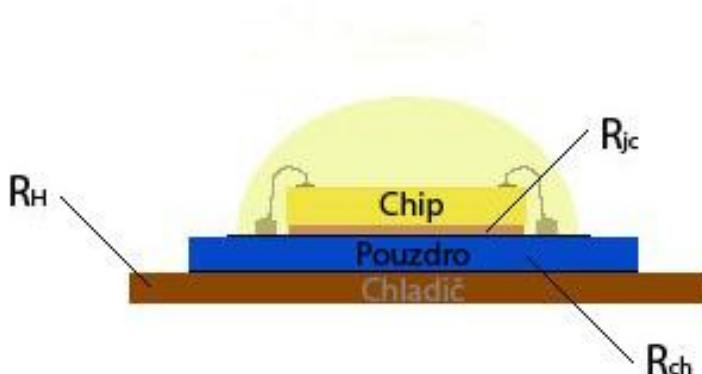
- *Posledním bodem je orientace čipu a chladiče, jehož žebra by měla být kolmá ke chlazenému povrchu pro nejlepší odvod tepla. Jestliže orientace bude opačná, může to mít za následek blokování tvoření konvekčních vzdušných proudů a podstatně redukovat chladicí schopnosti.*

6.1 Tepelný odpor zapouzdřené součástky

Tepelný odpor charakterizuje míru schopnosti odvádět ztrátové teplo z místa vzniku a jedná se o převrácenou hodnotu teplotní vodivosti. Jeho hodnota je výrazně limitována technologií zapouzdření součástky a použitými materiály. Na obrázku č. 6.1 jsou jednotlivé tepelné odpory u LED modulu naznačeny. Výsledná hodnota tepelného odporu R_{JA} se skládá:

$$R_{JA} = R_{JC} + R_{CH} + R_H \quad (6.1)$$

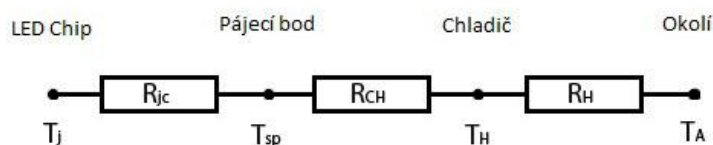
kde R_{JA} – (Junction/Chip-Ambient) tepelný odpor mezi čipem a okolím ($K \cdot W^{-1}$),
 R_{JC} – (Junction-Case) tepelný odpor mezi čipem a pouzdrem ($K \cdot W^{-1}$),
 R_{CH} – (Case-Heat sink) tepelný odpor mezi pouzdrem a chladičem ($K \cdot W^{-1}$),
 R_H – (Heat sink) tepelný odpor mezi chladičem a okolím ($K \cdot W^{-1}$).



Obrázek č. 6.1: Naznačení tepelného odporu LED modulu

Ve většině případů jsou LED montovány na deskách plošného spoje s kovovým jádrem, které jsou napojeny na chladič. Teplo tímto způsobem může proudit do chladiče vedením (kondukcí). Chladič předané teplo rozptýlí do okolí prouděním (konvekci). Nejčastěji je kontaktní tepelný odpor mezi přechodem a kovovou deskou plošného spoje (či chladičem) menší vzhledem k tepelnému odporu mezi přechodem a okolím.

Pro objasnění celé situace se používá modelového znázornění tepelného odporu pomocí obvodu s rezistory a výsledný tepelný odpor je roven rovnici (6.1). Model tepelného odporu s použitím chladiče znázorňuje obrázek č. 6.2.

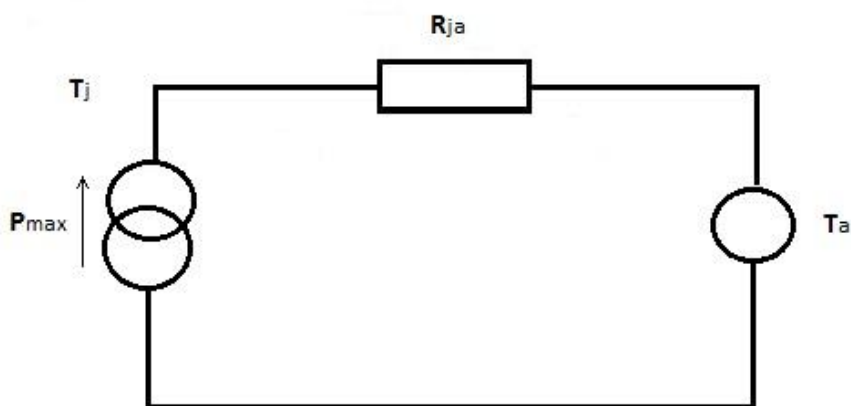


Obrázek č. 6.2: Model tepelného odporu zapouzdřené součástky

Pro celkové tepelné schéma je ještě do výsledného obvodu nutné zařadit zdroj tepla (generované PN přechodem) a zdroje teploty charakterizující okolní prostředí, do kterého je teplo odváděno. Na obrázku č. 6.3 je znázorněno, jak takové schéma nahrazené celkovým tepelným odporem vypadá. Maximální výkonovou zatížitelnost elektronické součástky přepočtená na jednoprvkový model je dána vztahem:

$$P_{\max} = \frac{T_{j,\max} - T_a}{R_{ja}} \quad (6.2)$$

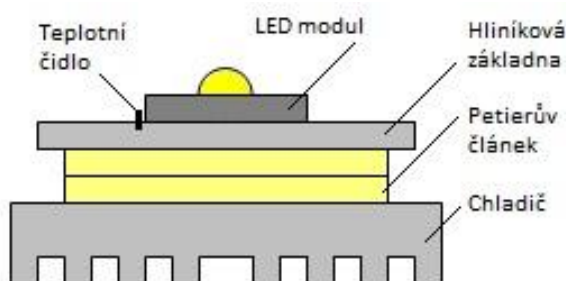
kde $P_{\max}$ – maximální ztrátový výkon (W),
 $T_{j,\max}$ – maximální přípustná teplota čipu (K),
 T_a – teplota okolí (K),
 R_{ja} – tepelný odpor mezi čipem a okolím ($K \cdot W^{-1}$).



Obrázek č. 6.3: Nahrazení dílčích tepelných odporů jediným prvkem

7 MĚŘENÍ PARAMETRŮ LED

Pro dosažení potřebných výsledků muselo být použito měřicího zařízení. Významné firmy ve světelné technice, zabývající se výzkumem a vývojem světelných zdrojů, používají laboratorní měřicí techniku za milionové částky, což je pro naše měření těžko dosažitelné z hlediska finančních prostředků, a proto bylo použito jednodušší zařízení, jehož jádrem je Peltierův článek. Tento článek se skládá ze dvou různých vodičů zapojených do série využívajících Peltierova jevu. Výsledkem průchodu elektrického proudu je zahřívání jedné strany styčné plochy článku a naopak druhá strana se ochlazuje. Takové vlastnosti umožňují dokonalou regulaci teploty během krátkého časového úseku. Pro představu je na obrázku č. 7.1 uveden zjednodušený model měřicího zařízení.



Obrázek č. 7.1: Zjednodušený model části měřicího zařízení

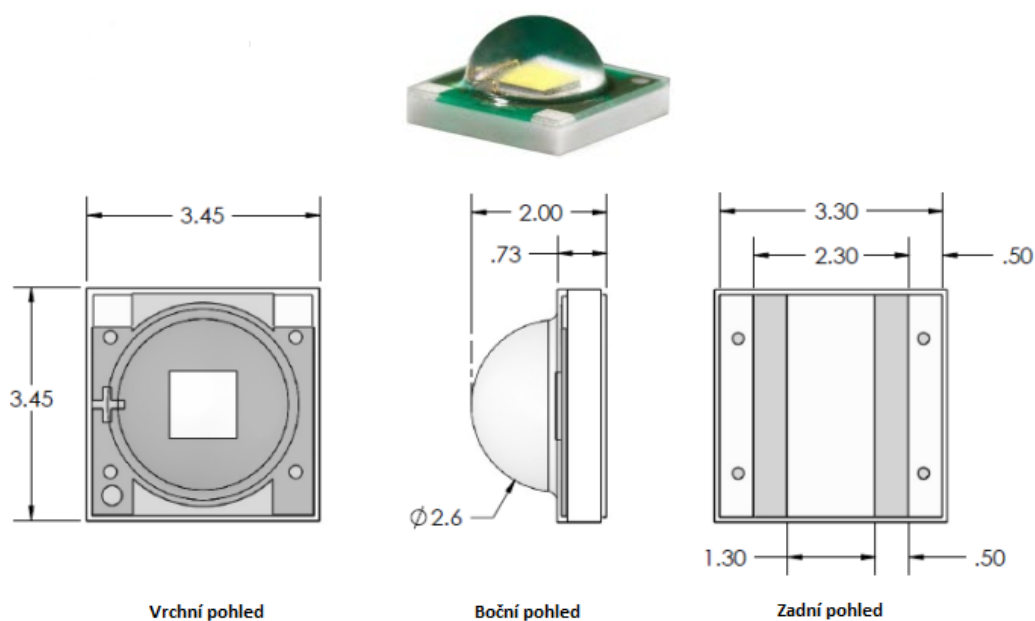
Měřicí zařízení se tedy skládá z výše zmíněného Peltierova článku, který je chlazen velkým chladičem, jehož součástí je aktivní ventilátor. Hliníková základna pro lepší rozložení tepla dopomáhá spolu s teplotním čidlem ke správné funkci celého zařízení k nastavení požadované teploty na měřeném LED modulu. Do celého systému vstupují dvě proměnné a těmi jsou teplota na čipu a jím procházející proud. Vystupující veličiny jsou úbytek napětí na PN přechodu a světelný tok vycházející z měřeného LED modulu měřený rychlou fotodiodou. Tyto veličiny jsou přivedeny na vícekanálový osciloskop a zpracovány na počítači. Druhotné veličiny, které se díky vystupujícím veličinám mohou dopočítat, jsou příkon diody (jako součin proudu a napětí na čipu) a měrný výkon (jako podíl světelného toku a příkonu diody).

Aby se čip nepoškodil, muselo být zvolen šetrný postup při měření, který spočíval v buzení LED pilovým generátorem umožňující rychlé měření až do 300% hodnoty jmenovitého proudu při periodě v intervalu 100 ms až 1 sekunda. Tento způsob měření v krátkých pulzech zabezpečí spolehlivé měření parametrů při zachování téměř veškeré životnosti vlivem většího namáhání.

7.1 Testovaná LED – CREE XLamp XP-E

Jedná se o LED s čipem od jednoho z největších průkopníků v oblasti světelných zdrojů a tím je firma CREE. Měřená LED je následníkem předchozí řady XR-E s mnohem lepšími parametry, avšak staví na menších rozměrech, které jsou o 80% menší než u předchůdce (na obrázku č. 7.2 je pohled na LED i s jejími rozměry v milimetrech) Inovovaná optika přináší změnu v oblasti vyzařovacího úhlu, jež je širší a rozložení světelného kuželu plynulejší. Výrobce nabízí několik variant lišících se barvou vyzařování a společné parametry pro tento čip jsou:

- *jmenovitá hodnota proudu: 350 mA,*
- *maximální hodnota proudu: 1000 mA,*
- *jmenovitý příkon: 1 W,*
- *maximální teplota přechodu: 150°C. [14]*

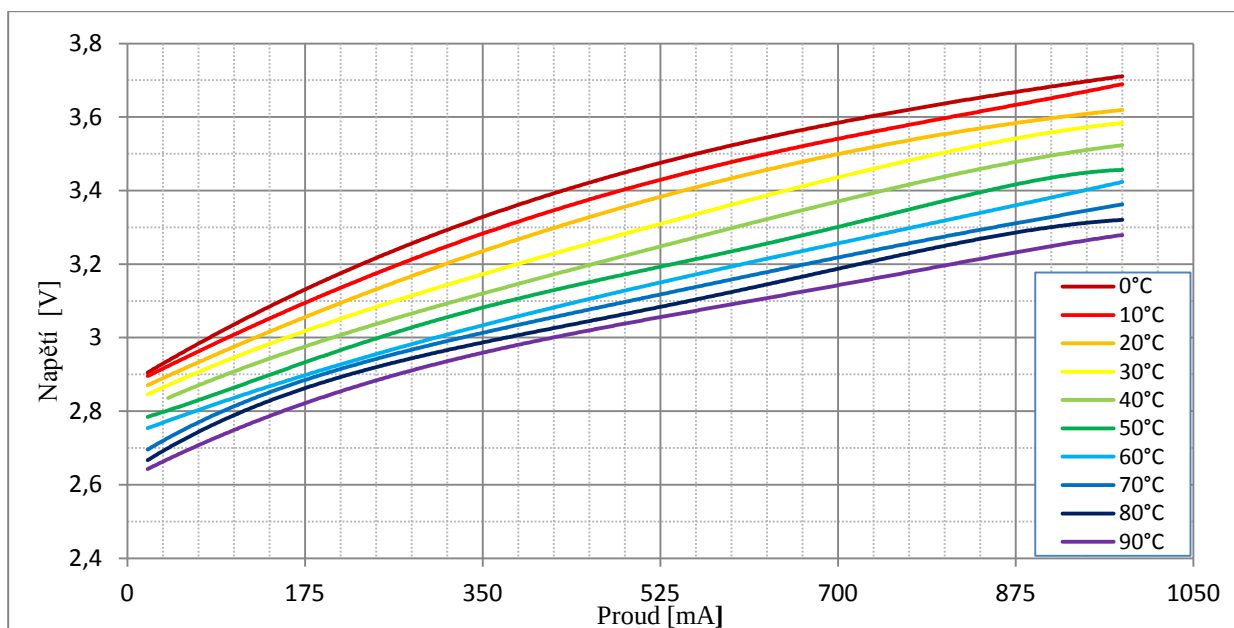


Obrázek č. 7.2: CREE XP-E a jeho rozměry [14]

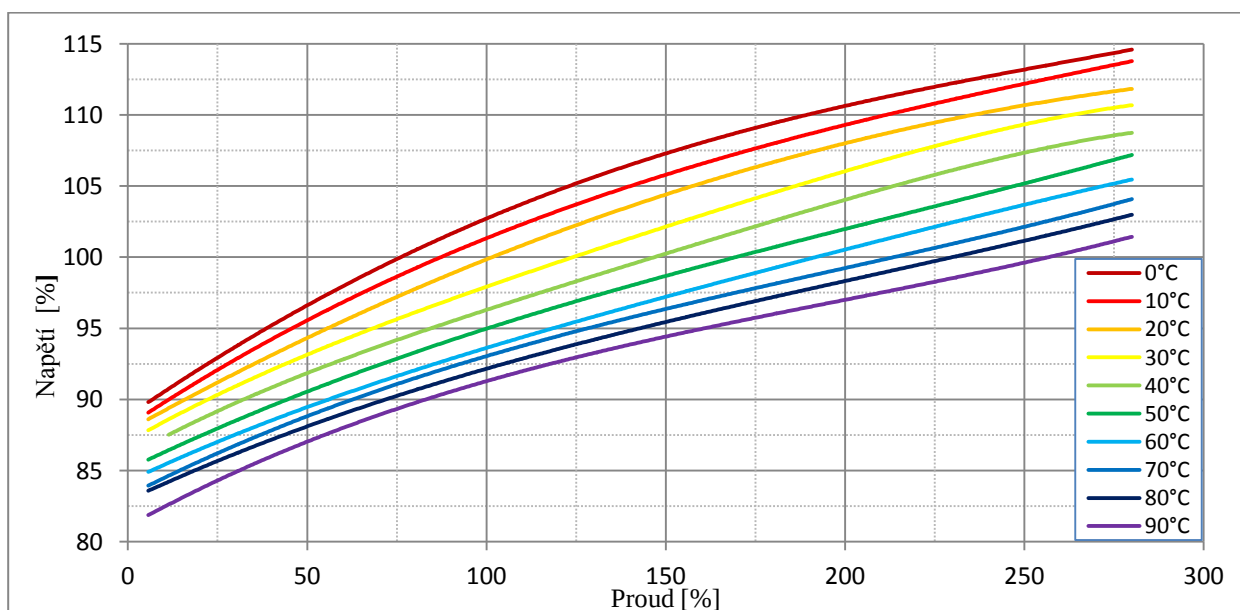
7.2 Zpracované hodnoty měření

Výsledné naměřené hodnoty jsou graficky zpracovány v absolutních a relativních hodnotách, kde jako referenční je hodnota při jmenovitém proudu (350 mA) a teplotě 20°C. Měření bylo uskutečněno po kroku 10°C.

Na obrázku č. 7.3 je uvedena grafická závislost napětí přechodu na procházejícím proudu LED diodou v absolutních, respektive na obrázku č. 7.4 v relativních hodnotách. Ze závislostí je zřejmé, že se stoupající teplotou přechodu napětí na něm klesá.

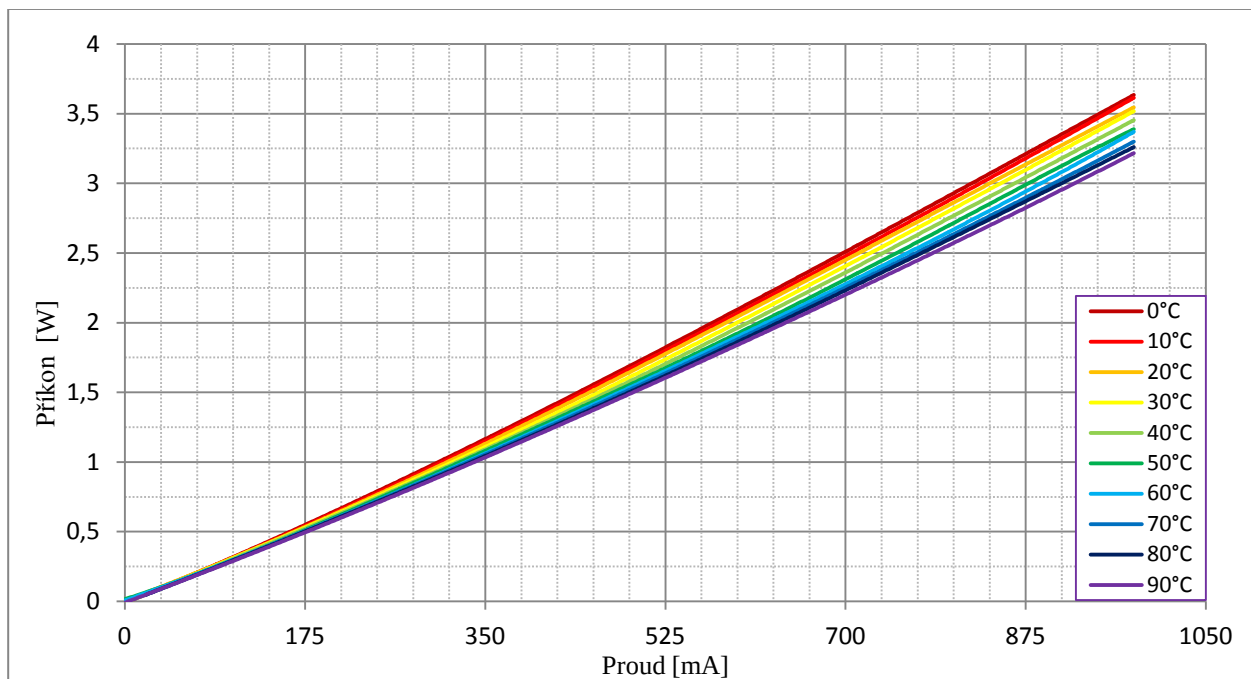


Obrázek č. 7.3: Závislost napětí na procházejícím proudu v absolutních hodnotách při různých teplotách PN přechodu

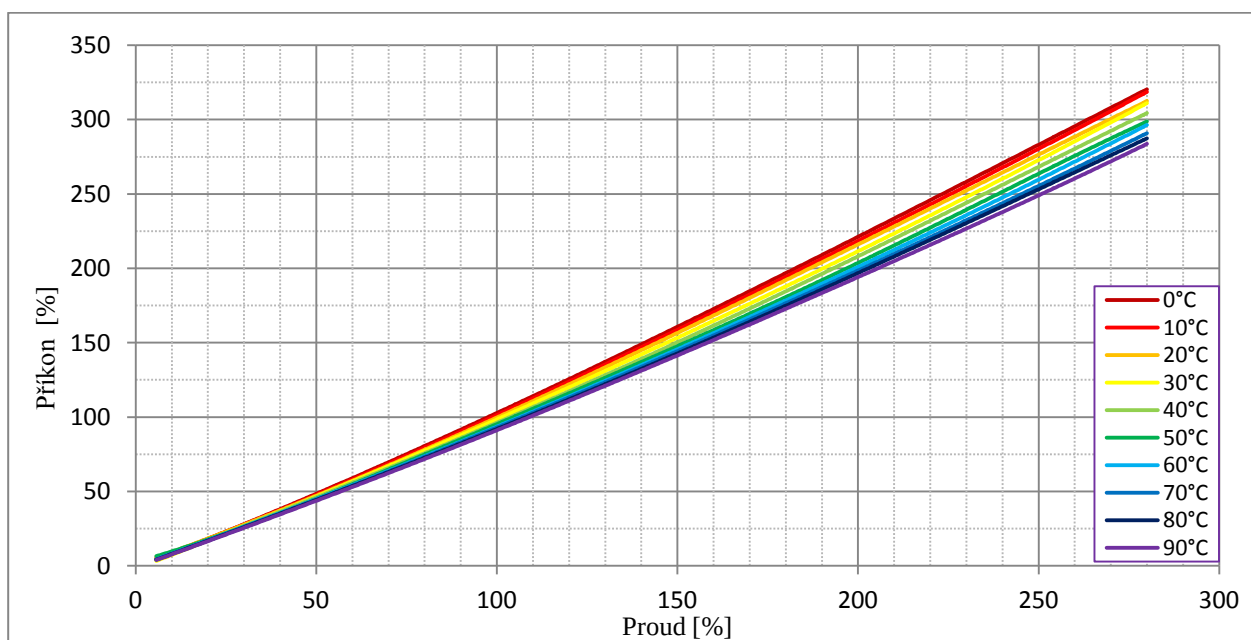


Obrázek č. 7.4 : Závislost napětí na procházejícím proudu v relativních hodnotách při různých teplotách PN přechodu

Na obrázku č. 7.5 je uvedena grafická závislost příkonu LED čipu na procházejícím proudu v absolutních, respektive na obrázku č. 7.6 v relativních hodnotách. Se zvyšujícím se proudem příkon LED diody téměř lineárně stoupá a naopak rostoucí teplota zapříčiní pokles příkonu, hlavně od nominální hodnoty proudu je tento pokles čím dál víc zřetelný.

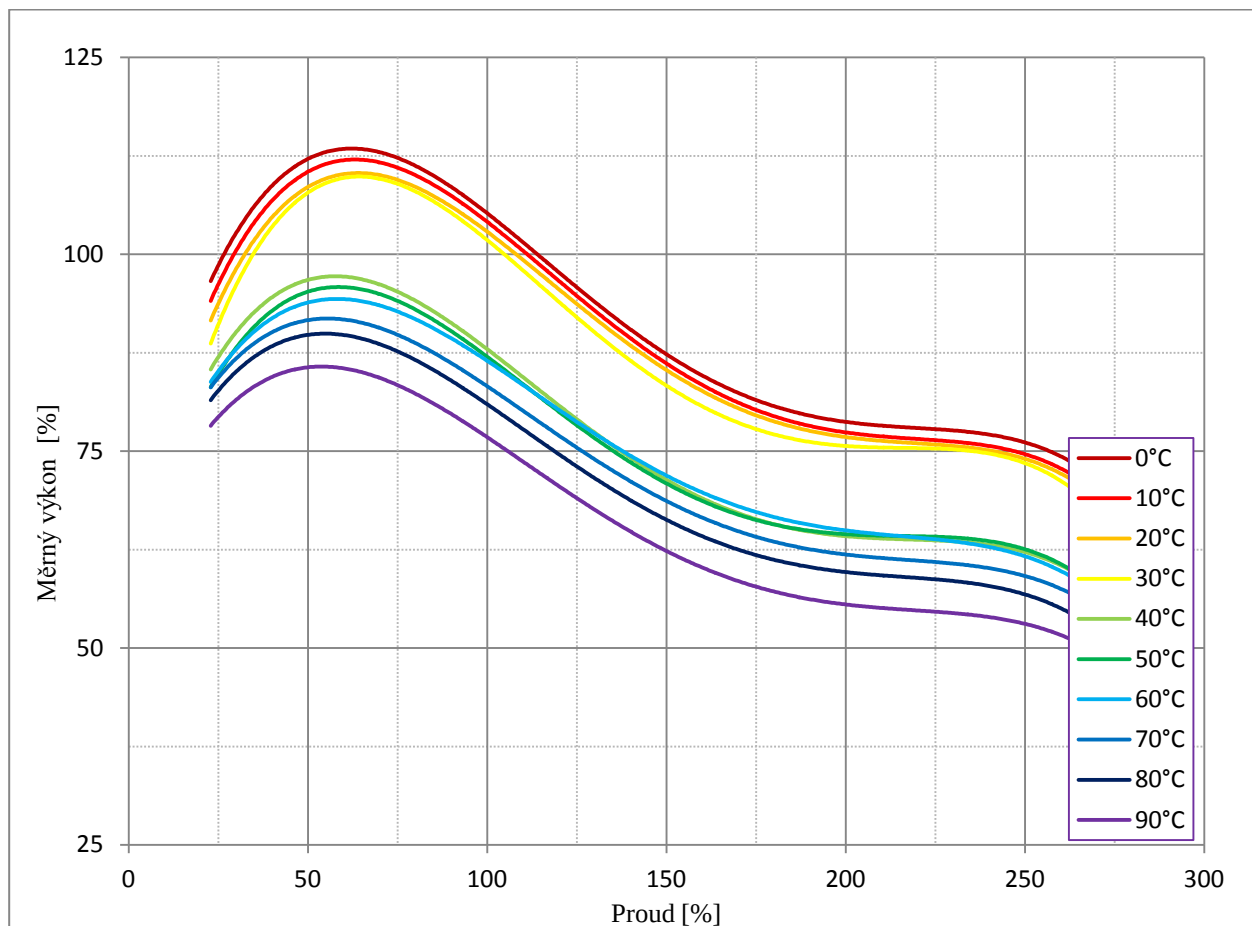


Obrázek č. 7.5.: Závislost příkonu na procházejícím proudu v absolutních hodnotách při různých teplotách PN přechodu



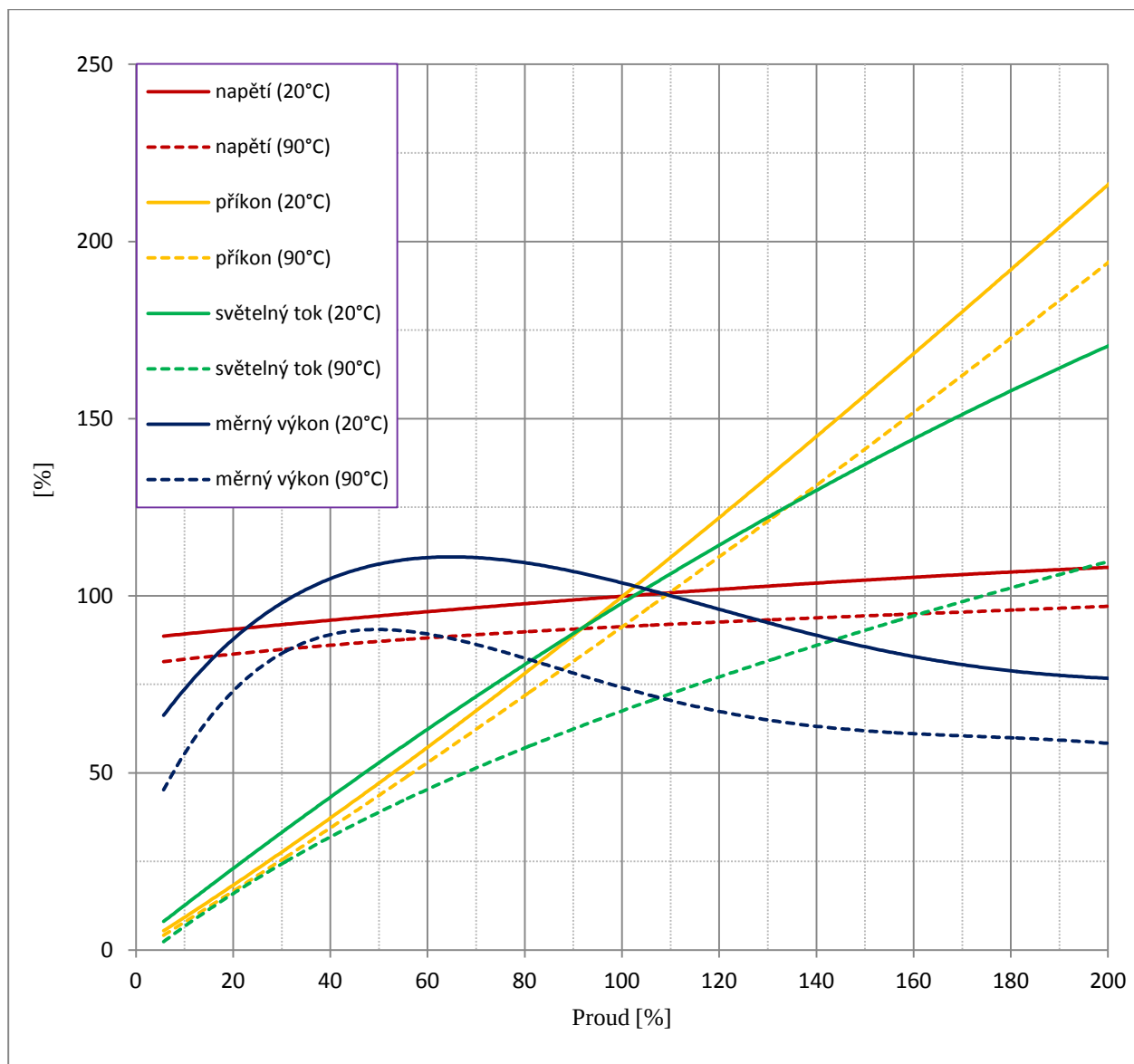
Obrázek č. 7.6: Závislost příkonu na procházejícím proudu v relativních hodnotách při různých teplotách PN přechodu

Obrázek č. 7.7 zobrazuje závislost měrného výkonu na procházejícím proudu LED diodou. Měrný výkon reprezentuje účinnost přeměny elektrické energie na světelnou a v tomto případě je patrné, že při přibližně 70% hodnoty jmenovitého proudu dosahuje měrný výkon nejvyšších hodnot (při 0°C se jedná o 113% hodnoty měrného výkonu oproti jmenovité hodnotě). Se zvyšující se teplotou měrný výkon podstatně klesá.



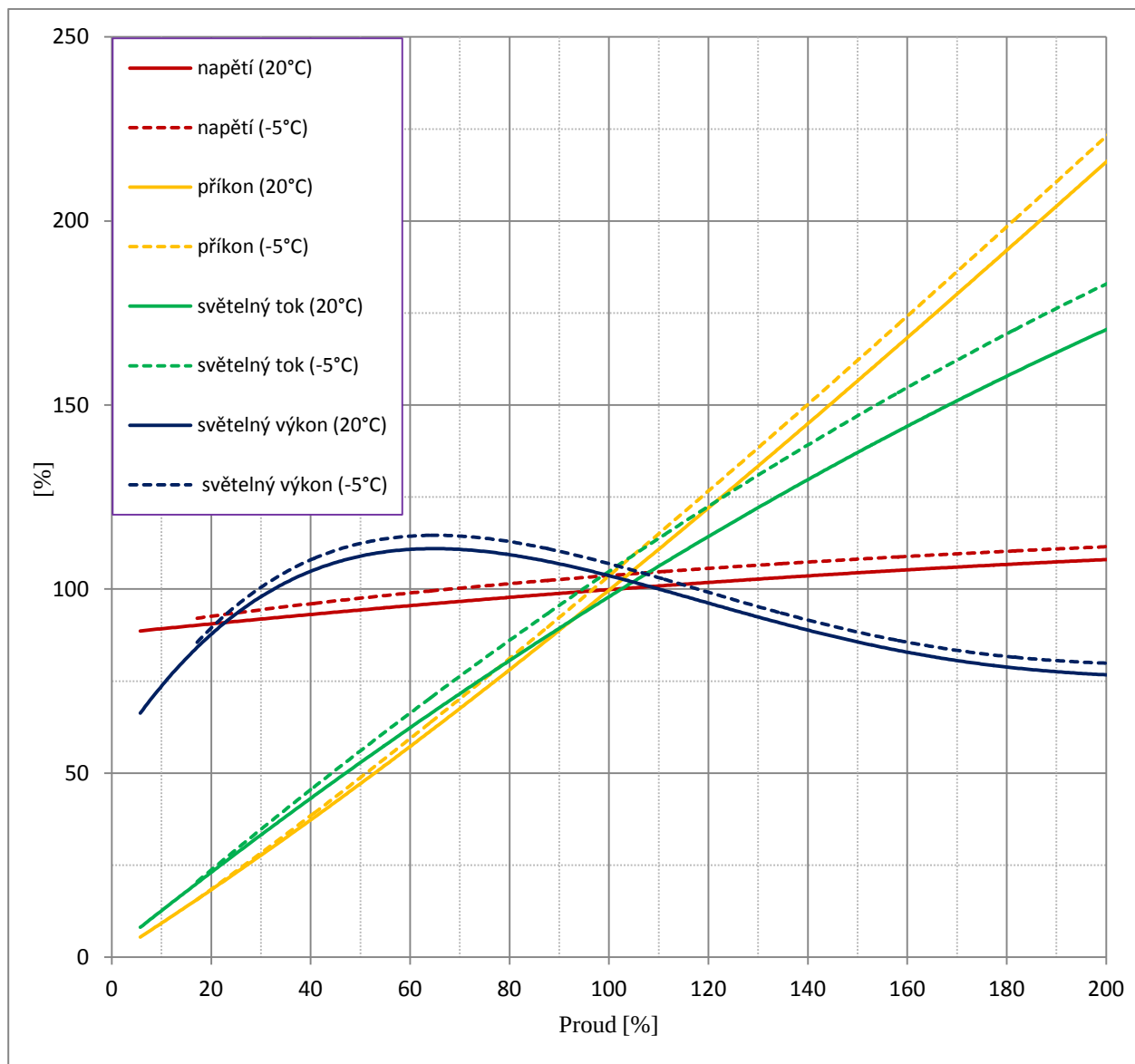
Obrázek č. 7.7: Závislost příkonu na procházejícím proudu v relativních hodnotách při různých teplotách PN přechodu

Křížové charakteristiky uvedené na obrázku č. 7.8 ukazují výrazný pokles měřených veličin při teplotě přechodu 90°C (nejvyšší měřená teplota) oproti referenční teplotě 20°C. Napětí přechodu při 90°C nemá tak markantní pokles hodnot jako světelný tok, který při nominální hodnotě proudu je přibližně o 30% nižší oproti měření při referenční teplotě. Spolu se světelným tokem je vidět pokles měrného výkonu, jež vychází právě ze světelného toku, u kterého při hodnoty jmenovitého proudu je zásadní pokles o 50% proti referenční hodnotě.



Obrázek č. 7.8: Křížové charakteristiky LED při 20°C (plná čára) a 90°C (přerušovaná čára)

Další křížové charakteristiky uvedené na obrázku 7.9 ukazují odlišnou situaci než na obrázku č. 7.8. Zde je znázorněno porovnání s nižší teplotou (-5°C) než referenční. Výsledkem je opačná situace-naměřené veličiny jsou lepší v porovnání s referenčními. Nejvýraznější je zlepšení v oblasti hodnot světelného toku, jež je s průchodem většího proudu stále větší. I hodnota příkonu čipu roste, takže zlepšení v oblasti měrného výkonu se od 60% hodnoty jmenovitého proudu pohybuje okolo 5%.



Obrázek č. 7.9: Křížové charakteristiky LED při 20°C (plná čára) a -5°C (přerušovaná čára)

7.3 Extrémní podmínky měření

V provozu elektronického zařízení mohou nastat výjimečné situace, jako jsou elektrické aspekty (zkraty, přepětí, proudové rázy atd.) nebo fyzikální (teplota, tlak, vibrace atd.). Pro měření odolnosti LED může být na použitou problematiku pohlíženo z několika hledisek.

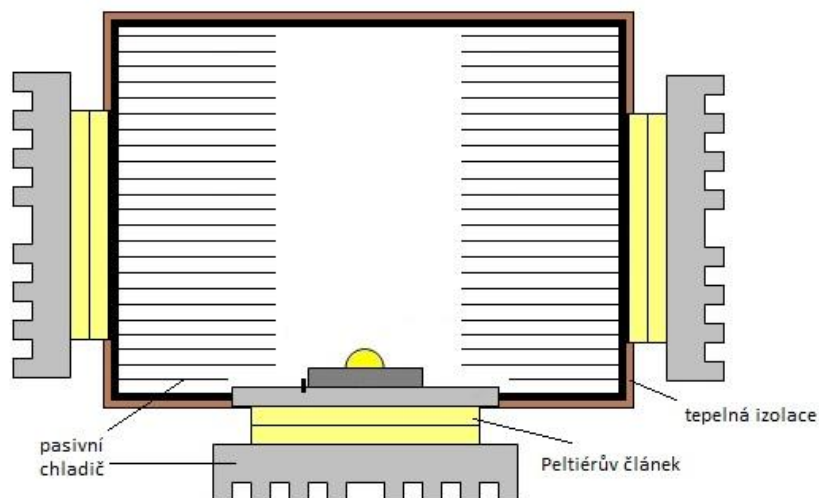
- *Extrémně zvýšená/snížená provozní teplota:*

Předchozí měření byla provedena šetrným způsobem k čipu LED diody, tak aby bylo možné po celou dobu dostávat data od teploty nepoškozeného čipu. Měření probíhalo v krátkých pulsech a teplota přechodu nepřekročila výrobcem stanovenou maximální teplotu. Takové podmínky nevedou ke znehodnocení LED. Někdy se ale může LED vystavit i jiným než provozním vlivům a proto zkoumání těchto extrémních podmínek má svoje opodstatnění.

Pro měření takových stavů by mohlo být použito stejného principu, jenž je uveden na začátku této kapitoly. Použitím Peltierova článku s vyšším výkonem by bylo možné využití vyšších teplot. Tím pádem i využitelnost proudového zdroje stoupá. Aby nebyla překročena maximální hodnota proudu procházejícím Peltierovým článkem, musí být zdroj opatřen patřičnou regulací. Průběh proudu nemusí být z pilového generátoru, neboť ten byl k LED diodě šetrný, ale pro tento případ postačí obdélníkový průběh s periodou v řádech minut či hodin, která by byla volena podle amplitudy takového signálu. Není žádoucí, aby byl čip zničen během okamžiku příliš vysokým proudem, a proto by volba takového průběhu měla být kompromisem mezi dobou měření a parametry použité LED. Aby měření neobsahovalo pouze výsledky v podobě informací z měřících přístrojů, tak použitím záznamového zařízení ve formě mikroskopu (s možností zaznamenávat obraz po nastavitelném časovém intervalu) je pro viditelné výsledky ideální. Velký jas LED diody by v takovém případě neumožnil použitelných snímků z mikroskopu, takže je na čoučku v nejlepším případě umístit filtr, který umožní vidět na snímku samotný čip a jeho následnou degradaci. Umístění mikroskopu by mělo být pevně uchyceno k celému měřicímu aparátu. Pro zamezení zkreslení snímků se může použít clona kolem zkoumané LED diody a mikroskopu.

Opačným příkladem je vliv nízké teploty na čip světelné diody, jehož parametry se výrazně zlepšují (viz výsledky měření této práce). V takovém případě není potřeba snímat záznamovým zařízením degradaci čipu, protože ta se dostavuje s vyšší teplotou. Nastínění měřícího schéma je na obrázku č. 7.10, kde je ochlazováno i prostředí (vzduch) kolem LED, aby nedocházelo k velké výměně tepla mezi vnějším a vnitřním prostředím je zde nastíněna izolace kolem celého krytu. Vnitřní žebrování napomáhá k lepšímu ochlazování a celé zařízení svým způsobem připomíná klimatizační jednotky.

Extrémnějším případem měření parametrů LED v nízkých teplotách by bylo zmražení čipu tekutým dusíkem, jehož teplota dosahuje necelých -200°C . Obecně platí, že odpor polovodiče s klesající teplotou exponenciálně stoupá a zmražením tekutým dusíkem výrazně změní jeho vlastnosti. Technické dokumentace LED diod obsahují rozsah pracovních hodnot, tak se tímto způsobem dá ověřit spodní hranice funkčnosti. Zmražením čipu, jež by byl na hliníkové základně spolu s teplotním čidlem, může být změřena teplota, od které začne LED emitovat světlo po vyndání čipu na pokojovou teplotu a jeho postupného oteplování.



Obrázek č. 7.10: Naznačení měření nízkých teplot provozu LED

- *Odolnost vůči závěrnému napětí:*

Závěrné napětí, označované jako U_{BR} (Breakdown), je velmi sledovaným parametrem při provozu LED. Jelikož z průběhu VA charakteristiky vyplývá, že do hodnoty závěrného napětí přechodem diody prochází nepatrný (téměř zanedbatelný) proud. Při překročení U_{BR} proud rapidně stoupá a může dojít ke zničení LED diody. Měřením pomocí proudových impulsů, jejichž krátká perioda v řádech mikrosekund a amplitudě jednotek A, tak by nemuselo dojít ke zničení, jelikož jsou pulsy velmi krátké, tak nedochází k lokálním průrazům. Po několika opakování měření může být podrobně proměřena VA charakteristika a porovnána s původní hodnotou. Antiparalelním zapojením klasické polovodičové diody se těmto účinkům dá zabránit, neboť proud prochází propustným směrem diody a LED dioda je chráněna, zejména v provozu střídavého proudu.

- *Proudová odolnost v propustném směru:*

Stejně jako měření odolnosti vůči závěrnému napětí se dá měřit i odolnost vůči proudovým impulsům v propustném směru, které se v obvodu napájení mohou vyskytnout. LED dioda začíná emitovat světlo až po překročení prahového napětí a začíná jí téci proud. Jako pokus odolnosti se jeví vystavování LED krátkodobým nebo dlouhodobým proudovým impulsům, jež mohou poškodit (v případě krátkodobých) přechod LED, v lepším případě pouze zhoršit vlastnosti vlivem namáhání přechodu a zánikem nosičů náboje podílejících se na rekombinacích, nebo v opačném případě (dlouhodobé impulsy) může dojít až k trvalé destrukci LED.

8 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s problematikou LED diod a jejich změn provozních vlastností. Ve druhé kapitole je uvedena vnitřní struktura světelných diod a ve třetí se práce zabývá vývojem LED diod při vynalezení bílých světelných diod, které znamenaly pro toto odvětví výrazný zlom v osvětlovací technice.

Další kapitola je věnována problematice oteplování diody a s tím spojené i životnosti celého modulu. Při snaze výrobců dosáhnout co největšího výkonu je aplikace chlazení nezbytnou součástí návrhu.

Měřením LED diody Cree XLamp XR-E se zjistilo, že stoupající teplota má nepříznivý vliv na parametry světelné diody. Provozováním LED diody s teplotou přechodu 90°C znamená výrazný pokles světelného toku o přibližně 30% hodnoty oproti referenční teplotě 20°C při napájení jmenovitým proudem. Při napájení vyššími hodnotami proudu má tato závislost světelného toku na proudu klesající charakter.

Dalším poznatkem při měření je hospodárnost napájení LED v podobě měření měrného výkonu, jehož závislost na proudu čipem světelné diody je na obrázku č. 7.7. Z této závislosti plyne fakt, že nejefektivnější provoz světelné diody Cree XR-E leží v intervalu 60-70% hodnoty jmenovitého proudu. Při takových podmínkách bylo možné se dostat až nad 100% hranici měrného výkonu. Tuto hranici se podařilo dosáhnout až do 30°C na přechodu diody a měření vyšších teplot už znamenalo výraznější pokles efektivnosti přeměny elektrické energie na světelnou.

Pro návrhy světelných soustav obsahujících technologii LED je tedy efektivnější provozovat celý systém osvětlení nižší než jmenovitou hodnotou proudu. Tímto způsobem klesne i množství produkovaného tepla z přechodu diody a technický život LED bude výrazně delší.

Technologie LED diod v oblasti osvětlovací techniky je v následujících letech na obrovském vzestupu a tlak na neustálé snižování spotřeby elektrické energie z ní dělá „světlem budoucnosti“. Má svoje výhody a svoje nevýhody, mezi které patří teplotní závislost PN přechodu světelných diod a jak je uvedeno v této práci-účinnost přeměny elektrické energie výrazně klesá s rostoucí teplotou PN přechodu. Pro další testování luminiscenčních diod by mohly být využity extrémnější podmínky a velmi zajímavou zkouškou se jeví zmrazení tekutým dusíkem a následná zkouška při postupném rozmražení na pokojovou teplotu, kdy LED dioda začne emitovat světlo a porovnat tento výsledek s parametry v technické dokumentaci výrobce.

LITERATURA

- [1] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje - světelné diody*. Časopis: SVĚTLO [online]. 2009(5), s. 68-71. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39810.pdf>
- [2] JEDLIČKA, Miroslav. *Světlo a fotonika – II. část*. Časopis: SVĚTLO [online]. 2005(4), s. 39. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=35019
- [3] KUSALA, Jaroslav. *Polovodiče*. Miniencyklopedie: Elektřina [online]. 2003. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz9.htm>
- [4] REICHEL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Fyzikální podstata přechodu PN*. Encyklopedie fyziky: Elektřina a magnetismus [online]. 2006. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/265-fyzikalni-podstata-prechodu-pn>
- [5] KRBAL, Michal a Petr BAXANT. *Statické hodnocení vlastností světelných zdrojů*. Časopis SVĚTLO [online]. 2011(1), s. 48-50. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43029.pdf>
- [6] SOUČASNÝ STAV A TREND VÝVOJE LED TECHNOLOGIE: Profesionál/Technika. O světle. Dostupné z: <http://www.osvetle.cz/index.php/professional/6-technikaprofes/41-soucasny-stav-a-trend-vyvoje-led-technologie.html>
- [7] MELČ, Antonín. *Světelné zdroje pro interiéry aneb jak nahradit klasickou žárovku*. Časopis: SVĚTLO [online]. 2009(1), s. 34-35. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38557.pdf>
- [8] Obrázek, Dostupné z: <http://inteledlight.en.made-in-china.com/product/TbMxFNEUAXhS/China-350mA-LED-Downlight-with-5-X-1w-Cree-Xr-E-LED-Light-Source-INTEL-LDL-5W-.html>
- [9] Obrázek, Dostupné z: <http://www.hero-ledstore.com/images/categories/mcek.jpg>
- [10] Obrázek, Dostupné z: <http://www.ceskasvetla.cz/userfiles/image/produkty/led-zarovky/led-zarovka-e27-132led.jpg>
- [11] Obrázek, Dostupné z: http://home.zcu.cz/~kapralp/img/RGB_in_w.gif
- [12] PUŽMANOVÁ, Rita. *LED – světlo budoucnosti*. Časopis: SVĚTLO [online]. 2009(5), s. 74-76. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39813.pdf>
- [13] SZENDIUCH, Ivan. *Mikroelektronika a technologie součástek*, skriptum VUT v Brně, Brno, 2003, Elektronický učební text, 118 s, www.feec.vutbr.cz.

-
- [14] Datasheet, *Cree XLamp XP-E*, Dostupné z:
<http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Data%20and%20Binning/XLampXPE.pdf>
- [15] PARK Jeong a Chin. C. LEE, *An Electrical Model With Junction Temperature for Light-Emitting Diodes and the Impact on Conversion Efficiency*, IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS. 2005(5), vydání: 26, s. 308-310