

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTROTECHNOLOGY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

VLIV VYBRANÝCH SLOŽEK PROVOZNÍHO PROSTŘEDÍ
NA SVÍTIVOST ELEKTROLUMINISCENČNÍCH DIOD

EFFECT OF SELECTED COMPONENTS OF THE ENVIRONMENT ON THE
LUMINOSITY OF LED

PRAHA 2018

AUTOR PRÁCE

Jakub Malíř

VEDOUCÍ PRÁCE

doc., Ing. Ivan Kudláček, CSc.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Malíř** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **457032**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv vybraných složek provozního prostředí na svítivost elektroluminiscenčních diod.

Název bakalářské práce anglicky:

Effect of selected components of the environment on the luminosity of LED

Pokyny pro vypracování:

1. Rozeberte příčiny stárnutí LED v provozním prostředí
2. Experimentální cestou ověřte vliv vybraných faktorů na svítivost LED

Seznam doporučené literatury:

1. ZVÁNOVEC, S. et al. Visible Light Communications Based on Street Lighting. In: GHASSEMLOOY, Z. et al., eds. Visible Light Communications: Theory and Applications. Boca Raton: CRC Press, 2017. p. 285-310. 1. ISBN 978-1-4987-6753-8.
2. HABEL, J. a ŽÁK, P. Terminologie LED světelných zdrojů. SVĚTLO. 2017, 2017(3), 4.
3. KUDLÁČEK, I. a MAREŠ A.. Kritický pohled na ekodesign kompaktních světelných zdrojů. Konstrukce. 2014, 13 70-72. ISSN 1213-8762.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Ivan Kudláček, CSc., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

doc. Ing. Ivan Kudláček, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Jako autor uvedené bakalářské práce prohlašuji, že jsem při vypracování všech úkolů spojených s touto prací neporušil žádná autorská práva osob, jejichž zdroje jsem využil k sepsání práce. Jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujícího autorského zákona č. 121/2000 Sb. Dále prohlašuji, že jsem k vytvoření práce využil legálních softwarových prostředků a všechny experimenty jsem prováděl pod dohledem způsobilé osoby nebo při jejím vědomí. Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce doc., Ing. Ivanu Kudláčkovi, CSc. za cenné rady a studijní prostředky poskytované během vypracování jednotlivých úkolů. Dále děkuji panu Ing. Martinu Horákovi za jeho laskavý přístup a zajištění všech experimentů. Děkuji ostatním katedrám, zejména katedře energetiky, katedře elektrotechnologie a dále laboratoři diagnostiky fotovoltaických systémů za umožnění měření a dokumentaci výsledků experimentů.

Anotace

Tato práce se zabývá funkčním principem LED (*Light emitting diode*) světelných zdrojů. V první části textu jsou rozebrány základní vlastnosti a stručná historie elektroluminiscenčních diod a možné příčiny poruch LED při provozu. Jsou zde popsány některé degradační mechanismy a jejich ukazatelé, dále pak možnosti, jak tyto projevy měřit a vyhodnocovat. Druhá část textu dokumentuje experimentální ověření degradace vybraných vlivů provozního prostředí na výkonových LED zdrojích. Tato část práce zahrnuje přípravu a provedení experimentů, měření vybraných parametrů a nakonec závěr shrnující dosažené výsledky.

Abstract

This work deals with the functional principle of LED (*Light emitting diode*) light sources. The first part of the text analyzes the basic characteristics and a brief history of the electroluminescent diodes and the possible causes of LED faults during operation. There are described some degradation mechanisms and their indicators, as well as the possibilities how to measure and evaluate these manifestations. The second part of the text documents the experimental verification of the degradation of selected influences of the operating environment on the power LED sources. This part of the thesis includes the preparation and execution of experiments, measurement of selected parameters and finally a conclusion summarizing the achieved results.

Klíčová slova

LED, polovodič, světelný tok, degradace, světelné spektrum, životnost, provozní prostředí

Keywords

LED, semiconductor, light flux, degradation, light spectrum, lifetime, operating environment

Obsah

Seznam použitých symbolů	13
1. Úvod.....	15
2. Teorie	16
2.1 Fyzikální povaha světla	16
2.1.1 Vnímání optického záření lidským okem.....	16
2.1.2 Radiometrické a fotometrické veličiny	17
2.2 Světelná emise v polovodiči	19
2.2.1 Polovodiče s vlastní vodivostí.....	19
2.2.2 Polovodiče s nevlastní vodivostí typu P.....	20
2.2.3 Polovodiče s nevlastní vodivostí typu N	20
2.2.4 Generace záření v P-N přechodu.....	21
2.3 Konstrukce LED	22
2.3.1 První konstrukční provedení.....	23
2.3.2 Emitované spektrum záření a voltampérová charakteristika LED	24
2.3.3 Provedení efektivního P-N přechodu u LED	25
2.3.4 Uspořádání vrstev LED	27
2.3.5 Konstrukční provedení LED čipu pro větší výkony	28
2.4 Výhody a nevýhody LED	30
2.4.1 Výhody LED	30
2.4.2 Nevýhody LED	31
2.5 Provozní vlastnosti a degradace LED	31
2.5.1 Stanovení životnosti LED	31
2.5.2 Degradace vlivem provozu.....	32
2.5.3 Účinky prostředí	33
2.5.4 Degradace vlivem vysokých okolních teplot.....	33
2.5.5 Působení chemických látek.....	35
2.5.6 Koncepce experimentů	37
3. Prováděné experimenty	39
3.1 Výběr experimentálních metod	39
3.1.1 Předešlé experimenty s oxidem siřičitým.....	39
3.1.2 Vzorky použité ve vlastních experimentech	42
3.1.3 Tepelné namáhání nenapájených LED při minimální vlhkosti	43
3.1.4 Tepelné namáhání napájených LED při minimální vlhkosti	44

3.1.5 Tepelné namáhání s vysokou relativní vlhkostí.....	44
3.1.6 Působení oxidu siřičitého na zhasnuté LED a následné působení vlhkosti.....	45
3.1.7 Měřené a posuzované parametry	47
3.2 Výsledky experimentů	49
3.2.1 Tepelné namáhání nenapájených LED při teplotě 120 °C.....	49
3.2.2 Tepelné namáhání napájených LED při teplotě 120 °C.....	51
3.2.3 Tepelné namáhání při vysoké relativní vlhkosti	54
3.2.4 Experimenty s oxidem siřičitým	56
4. Závěr	58
Použitá literatura	61
Seznam obrázků	64

Seznam použitých symbolů

Φ	světelný tok
Φ_e	zářivý tok
$\Phi_{e\lambda}(\lambda)$	zářivý tok dané vlnové délky
λ	vlnová délka
$K_\Phi(\lambda)$	světelná účinnost dané vlnové délky
K_m	celkový vyzařovaný výkon
$V(\lambda)$	poměrná světelná účinnost monochromatického záření
I	svítivost
Ω	prostorový úhel
γ	rovinná odchylka
I_γ	svítivost pod odchylkou γ
E	osvětlenost
A	velikost plochy
L	jas
η	měrný výkon
ν	frekvence fotonu
e	elementární náboj
h	Planckova konstanta
E_g	energie příslušející šířce zakázaného pásu
U_p	prahové napětí diody
c	rychlost světla ve vakuu
I_0	proud v pracovním bodě
V_0	napětí v pracovním bodě
V_F	značení pro prahové napětí v jiných textech (forward voltage)

R_c	celkový odpor
i	okamžitá hodnota proudu
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celsia
$\Delta u'$	změna teploty chromatičnosti
U_{max}	maximální hodnota napětí na modulech povolená výrobcem
I_{max}	maximální hodnota proudu povolená výrobcem
t_{cmax}	maximální teplota
t	čas
t_c	označení bodu pro měření teploty

1. Úvod

Již přes padesát let se setkáváme se světlo emitujícími diodami (LED), jejichž pole působnosti zasahuje do všech možných světelných aplikací. Za tuto dobu došlo v technologii LED k rozsáhlému vývoji a světelná účinnost používaných LED čipů se stále zvyšuje. Už od počátku se zdá, že tyto světelné zdroje předčí všechny ostatní světelné zdroje ve všech ohledech. Mezi všemi známými světelnými zdroji dosahují nejvyšších účinností přeměny elektrické energie na světlo, jejich výroba a provoz jsou šetrné k životnímu prostředí a životnost se odhaduje až na desetinásobky hodnot v porovnání se světelnými zdroji založenými na tepelném principu a výbojových světelných zdrojů. LED pro tyto své výhody nahrazuje dosavadní světelné zdroje ve všech možných osvětlovacích a signalizačních soustavách. Využití nalézá v osvětlení obytných prostor, pracoven, fabrik, veřejných prostor, osvětlení v autech, displeje počítačů, televizí a mnohé další.

Každá elektronická součástka má ale své hranice plynoucí z podstaty jejího technologického principu, které se mohou při provozu projevit. Pokud neošetříme podmínky provozu takto fungující součástky, může docházet k urychlení degradace nebo až k okamžitému selhání. V případě LED se s některými potýkáme již od počátků. Ukázalo se, že vlivem velmi nízkých provozních teplot LED čipů v porovnání s ostatními světelnými zdroji, klesá účinnost, světelný tok a LED urychleně degraduje již při teplotách okolí kolem 50 °C.

Bylo provedeno mnoho měření s LED různých výkonů a konstrukcí a byly prokázány poklesy životností LED s rostoucí teplotou. V této práci se proto zaměřím na intervaly teplot, kdy dojde k úplnému selhání LED již během několika desítek až stovek hodin. Lze očekávat, že tyto hodnoty budou o něco vyšší, než dosud zjištěné pro urychlenou degradaci kolem 100 °C.

Na scénu ale přichází i nová zjištění ohledně urychlené degradace LED světelných zdrojů vlivem chemických polutantů. Studie od jihokorejské firmy Samsung [31] pojednává o chemickém působení síry a organických těkavých složek na životnost LED modulů. Bylo uskutečněno několik měření se sirovodíkem a dalšími sloučeninami síry a chloru s LED a potvrdil se radikální pokles světelného toku v průběhu několika stovek hodin zakončený úplným selháním LED. Jedním z mnoha možných kandidátů pro urychlení degradace LED vlivem znečištění sírou je oxid siřičitý. S ním se můžeme setkat téměř všude ve městech, továrnách, a všech průmyslových oblastech, kde dochází ke spalování síru obsahujících paliv (uhlí, ropa apod.). V další části práce se pokusím prokázat vliv oxidu siřičitého na urychlení degradace LED a ověřit tak správnost usuzování o chemické odolnosti.

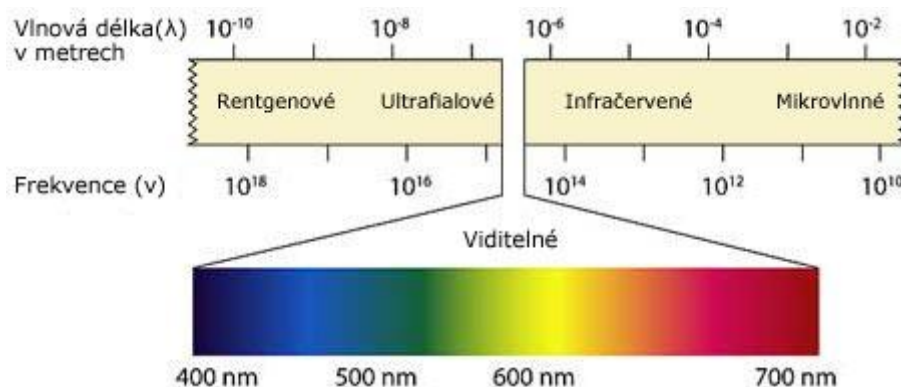
2. Teorie

2.1 Fyzikální povaha světla

Světlo hraje v našem životě jednu z nejdůležitějších rolí. Jedná se o šíření elektromagnetických vln v optickém prostředí. Díky odrazům, difúzi a přímému světelnému záření můžeme pomocí našich zrakových orgánů odhadovat vzdálenosti, porovnávat barvy a intenzitu ozařování. Světlo má jako elektromagnetické vlnění svá fyzikální specifika a lze ho kvantifikovat měřitelnými veličinami.

2.1.1 Vnímání optického záření lidským okem

Světlo, na něž lidské oko může nějakým způsobem reagovat, je pouze velmi malá část z širokého spektra elektromagnetického záření. Konkrétně se jedná o část s vlnovou délkou λ přibližně od 400 nm do asi 700 nm. Záření s vlnovou délkou větší než 700 nm označujeme jako infračervené, záření s kratší vlnovou délkou než 400 nm jako ultrafialové. Přirozené viditelné spektrum je spojitě, tudíž počet vlnových délek je i v této malé části spektra nekonečný. Níže na obrázku je znázorněno viditelné spektrum v závislosti na vlnové délce a frekvenci (obr. 1).



Obrázek 1. Viditelné spektrum světla [1]

Jednotlivé barvy jsou ve viditelném spektru spojitě rozloženy tak, že každé barvě můžeme přiřadit konkrétní vlnovou délku. Lidské oko pak reaguje na jednotlivé barvy různým způsobem. Výsledný zrakový vjem je pak závislý na jednotlivých vlastnostech světelného toku vstupujícího do oka. Viditelné světlo může uměle vznikat při termoemisi, např. v žárovce, excitací atomu v elektrickém výboji, např. v zářivce, některým typem luminiscence, např. v zářivce, a emisí fotonu z polovodiče, jímž prochází proud, např. LED diody.

Každý jedinec má vždy alespoň mírně odlišné vnímání barev a hranice viditelné části spektra tak nejsou pevně dány, ale liší se u jednotlivců v řádu až desítek nm. Proto v případě využití světelných zdrojů k osvětlování prostor je pak nutné vycházet z idealizovaného

pozorovatele, kdy je vnímání jednotlivých barev, a tedy i jednotlivých vlnových délek, matematicky normalizováno. [1]

2.1.2 Radiometrické a fotometrické veličiny

Pro případ posuzování světelného zdroje ze strany pozorovatele používáme několik světelně technických veličin, z nichž některé mohou být přímo měřitelné. Optické záření můžeme kvantitativně popsat radiometrickými veličinami, zatímco část viditelného spektra veličinami fotometrickými. Níže jsou odvozeny základní radiometrické a fotometrické veličiny využívané v posuzování jednotlivých světelných zdrojů.

První a nejzákladnější fyzikální veličinou, která kvantitativně charakterizuje každý světelný zdroj, je *zářivý tok* Φ_e [W], který udává distribuci veškeré energie ve formě elektromagnetického záření do prostoru. Jedná se o radiometrickou veličinu, tedy zahrnující všechny vlnové délky bez uvažování zrakového vjemu. Pokud bychom měli k dispozici závislost zářivého toku na vlnové délce $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$, potom je možné celkový zářivý tok zdroje (resp. přijímače) vyjádřit pomocí integrálu v případě spojitého spektra vyzařování

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

nebo sumou v případě diskrétního spektra

$$\Phi_e = \sum_{i=1}^n (\Phi_{e\lambda}) \lambda_i. \quad (2)$$

Veličina *světelný tok* Φ [lm] (lumen) a další zde jmenované veličiny jsou už veličinami fotometrickými – pracující s viditelnou částí světelného spektra. Světelný tok je ta část zářivého toku, která už je vyhodnocena na základě vnímání a citlivosti lidského oka. Abychom mohli ze zářivého toku Φ_e vyjádřit celkový světelný tok Φ , potřebujeme znát určitou poměrnou závislost na jednotlivých vlnových délkách viditelné části spektra. Touto závislostí je právě *poměrná účinnost monochromatického záření* $V(\lambda)$. Kvůli ryzí subjektivitě vnímání barev (každý jedinec může zrakově vnímat ty samé barvy mírně odlišně) je tato funkce normalizována pro fotonické vidění pomocí normálního rozdělení na celém spektru viditelného záření. Pro tuto rozdělovací funkci můžeme psát

$$V(\lambda) = \frac{K_{\Phi}(\lambda)}{K_m}, \quad (3)$$

kde $K_{\Phi}(\lambda)$ [lm/W] je světelná účinnost pro určitou vlnovou délku λ a K_m je maximální světelná účinnost záření. Tato hodnota nabývá pro normální rozdělení účinnosti viditelného spektra záření pro 1 W celkového vyzařovaného výkonu $K_m = 683 \text{ lm/W}$ při vlnové délce 555 nm. Světelný tok pro konkrétní vlnovou délku λ lze pak vyjádřit vztahem

$$\Phi(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = 683 \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda). \quad (4)$$

Výsledný světelný tok pro spojité spektrum viditelného světla je pak dán integrálem

$$\Phi = 683 \int_0^{\infty} \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\lambda} V(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

funkce $\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ můžeme nazvat spektrální hustotou zářivého toku. Celkový světelný tok je tedy celkový zářivý tok zpracovaný při fotopickém vidění.

Další světelně-technickou veličinou je *svítivost* I [cd] (kandela). Ta je definována pomocí rozložení celkového vyzářeného světelného toku do prostorového úhlu v určitém směru

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}, \quad (6)$$

kde Ω [sr] je část celkového prostorového úhlu, jež činí 4π . V ideálním případě pro měření svítivosti vycházíme z bodového zdroje světla. V praxi se spokojíme se zanedbatelnými rozměry světelného zdroje vzhledem ke vzdálenosti, v jaké svítivost měříme. Obecně je v takovém měření požadováno, aby rozměry zdroje světla byly přinejmenším pětkrát menší, než vzdálenosti, ve kterých měříme. Skutečné měření svítivosti provádíme většinou v určitých směrech po úsecích (řezech) a získáme tak čáry svítivosti v daných polorovinách. Výsledný obraz je pak často vynášen v polárních souřadnicích a svítivost je dána jako funkce závislá na odchylce od nějaké základní vztažné osy $I_\gamma = I_0 \cdot f_I(\gamma)$, kde I_γ je svítivost změřená pod odchylkou γ od vztažné osy se svítivostí I_0 a $f_I(\gamma)$ je funkce odchylky udávající poměrnou velikost.

Další důležitou světelně-technickou veličinou je *osvětlenost* $E = \frac{d\Phi}{dA}$, kde A značí velikost plochy kolmé k průvodiči vycházejícímu z bodového zdroje. Jedná se tedy o světelný výkon dopadající na určitou plochu.

Nejdůležitější fotometrickou veličinou, na kterou lidské oko přímo reaguje, je *jas* L . Mozek poté vyhodnocuje kontrast jasu, který je dán plošnou i prostorovou distribucí světelného toku do prostoru. Analyticky tedy pro něj můžeme odvodit vztah

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA}. \quad (7)$$

Je patrné, že celkový jas je tedy určitou prostorovou hustotou svazku paprsků.

V neposlední řadě hraje důležitou roli také *teplota chromatičnosti* vztažena na záření absolutně černého tělesa. U tohoto jevu je konkrétní barva vyzařování přímo svázána s teplotou toho tělesa v kelvinech (obr. 2).



Obrázek 2. Rozložení teploty chromatičnosti [1]

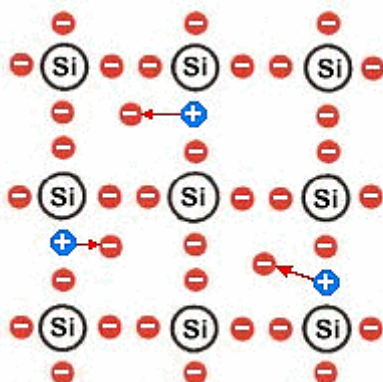
K samotnému posouzení celkové účinnosti a efektivnosti světelného zdroje slouží bezprostředně *měrný výkon* η [lm/W], představující celkový spotřebovaný výkon pro generování celkového světelného toku, a technická životnost světelného zdroje udávaná v počtu odsvícených hodin. Jak dále uvidíme, jsou hodnoty těchto dvou vyjmenovaných veličin důležitou předností u LED diod. [1]

2.2 Světelná emise v polovodiči

Jak bylo výše zmíněno, jednotlivé světelné zdroje se liší jednak fyzikálním principem, na kterém je tvorba viditelného světla založena, jednak i povahou generovaného světla. Generované viditelné světlo může obsahovat spojitě rozložené vlnové délky, nebo pouze jednotlivé hodnoty vlnových délek, a může se jednat o koherentní záření, kdy vyzářené fotony mají souhlasnou fázi nebo polarizaci a mohou tudíž interferovat, nebo naopak. Podle principů dnes uplatňovaných v elektrických světelných zdrojích můžeme rozdělit světelné zdroje na tři skupiny. První jsou zdroje založené na tepelném principu, kde je vznik elektromagnetického záření důsledkem tepelného vybuzení elektronů v atomovém obalu. Teplo je generováno obvykle průchodem proudu, např. wolframovým vláknem uvnitř žárovky. V další skupině, výbojových zdrojích, dochází k elektrickému výboji ve zředěných plynech. Dále se využívají výpary kovů, kdy se urychlené elektrony pružně srážejí s atomy a vzniká elektromagnetické záření někdy i kratších vlnových délek. Poslední skupinou jsou zdroje založené na elektroluminiscenci, tedy průchodu proudu v polovodiči, která je přímým principem LED, čili *Light-emitting diode*, a polovodičových laserů. V tomto případě se elektron nachází v excitovaném stavu a přechodem na nižší energetickou hladinu může vyzářit foton o určité vlnové délce. [1], [8]

2.2.1 Polovodiče s vlastní vodivostí

Pokud bychom zahřívali na určitou teplotu monokrystal křemíku, zjistili bychom, že se některé valenční elektrony uvolní ze svých kovalentních vazeb a mohou se pohybovat krystalovou mřížkou. To je způsobeno dodáním energie elektronům, jež je větší než šířka zakázaného pásu, který pro čistý křemík činí přibližně 1,2 eV. V důsledku opuštění elektronu původního místa v krystalové mřížce atomu křemíku vzniká jakýsi prázdný prostor a tento se nepřítomností záporného elektronu jeví jako kladný náboj. Tento kladný náboj nazýváme „díra“. Postupnou migrací elektronů z díry na jinou díru se též tyto díry mohou pohybovat dále v krystalové mřížce směrem souvisejícím s pohybem elektronů. V případě jako u monokrystalu křemíku, kdy je vždy aktuální počet děr i elektronů shodný mluvíme pak o *vlastní vodivosti* a o polovodiči s vlastní vodivostí (obr. 3).

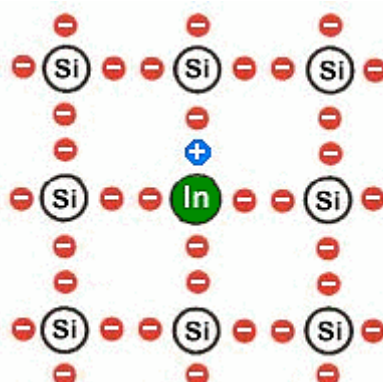


Obrázek 3. Schéma krystalové mřížky křemíku, polovodiče svlastní vodivosti [5]

Dnes běžně používanými typy polovodičů s vlastní vodivostí jsou monokrystaly křemíku Si a germania Ge. Důležitým požadavkem na všechny polovodiče s vlastní vodivostí je především vysoká čistota, bezporuchovost a celistvost krystalové mřížky. [5], [8]

2.2.2 Polovodiče s nevlastní vodivostí typu P

Výše popsáný čistý monokrystal křemíku, jakožto vlastní polovodič, je tvořen čtyřvaznými atomy křemíku. Všechny vazby mají jednoznačný kovalentní charakter a jsou tvořeny elektronovými páry. Pokud bychom jeden atom křemíku zaměnili za atom s menším počtem valenčních elektronů, např. atomem India s třemi valenčními elektrony, bude na jedné vazbě tohoto atomu s atomem křemíku chybět jeden elektron, tedy vznikne díra. Vzniklá díra opět může vlivem záměny s elektrony driftovat po krystalové mřížce. V tomto případě je ale celkový počet děr větší o jednu než je celkový počet volně pohyblivých elektronů. V případě, kdybychom v takovém monokrystalu křemíku vyměnili každý milióntý atom za atom india, můžeme získat dostatečný počet děr, který tak může sloužit k vedení kladného náboje. Pokud tedy hovoříme o polovodiči, který byl vlivem jiného prvku obohacen o počet děr, nazývá se tento polovodič polovodičem s *nevlastní vodivostí typu P* (positive) a majoritními nosiči náboje jsou zde díry (obr. 4).

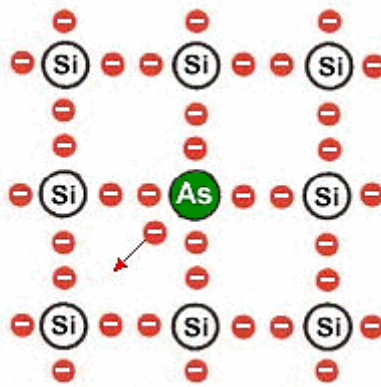


Obrázek 4. Atom india dodávající do celkového počtu nosičů náboje díru navíc [5]

Dá se využít více trojmocných prvků jako např. hliník, bor nebo i galium. Jednotlivé příměsi se ale budou ve vlastním polovodiči chovat mírně odlišně. To je dáno především rozdílnou šířkou zakázaného pásu. [5], [8]

2.2.3 Polovodiče s nevlastní vodivostí typu N

V opačném případě, kdybychom v monokrystalu křemíku zaměnili jeden atom s jiným atomem, tentokrát s pěti valenčními elektrony, např. arzenem, by jeden elektron přebýval nad počtem děr. Tento elektron se nebude podílet na žádné meziatomové vazbě a může se opět za daných podmínek volně pohybovat. Záměnou více atomů křemíku za atomy tohoto pětímocného prvku, volné elektrony mohou sloužit jako záporné nosiče náboje. Vzniká tak polovodič s *nevlastní vodivostí typu N* (negativ) u něhož jsou majoritními nosiči náboje elektrony (obr. 5).

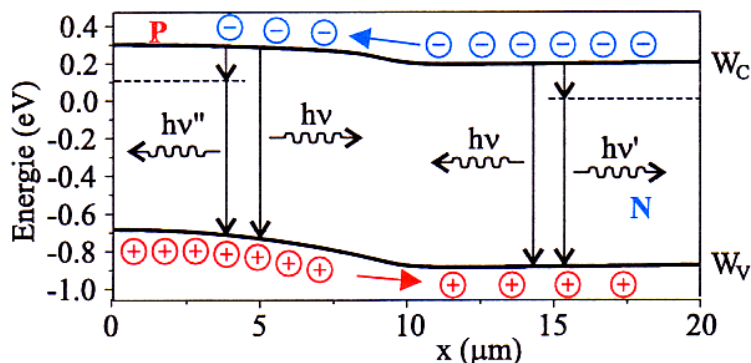


Obrázek 5. Atom arzenu v monokrystalu křemíku s elektronem navíc [5]

Typickým zástupcem příměsí využívaných v polovodičích typu N je právě arzen, dále pak fosfor nebo antimon. [5], [8]

2.2.4 Generace záření v P-N přechodu

Když k sobě přiložíme polovodiče s oběma typy nevlastní vodivosti N i P, některé elektrony a díry v určité oblasti na styku těchto polovodičů tzv. rekombinují, vytvoří neutrální pár. To je zapříčiněno vysokým gradientem koncentrace vzájemně opačných nosičů náboje. Takto vznikne neutrální P-N přechod tvořený tenkou vrstvou takto zrekombinovaných elektronů a děr. Pokud bychom nyní napájeli takový útvar stejnosměrným napětím tak, že k polovodiči typu N bychom přivedli kladný pól zdroje a k polovodiči typu P záporný pól zdroje, došlo by k postupné migraci elektronů a děr v této polovodičové struktuře. P-N přechod je ale tvořený neutrální vrstvou zrekombinovaných elektronů a děr. Vzniklá neutrální vrstva zapříčiní vznik elektrického pole řádu stovek milivoltů opačného směru, než je přiložené napětí. Při tomto zapojení se bude oblast P-N přechodu zeslabovat až dojde k průchodu malého proudu přes P-N přechod. V případě zapojení v opačné polaritě by se naopak vzniklý P-N přechod posiloval a v ideálním případě by k žádnému přenosu náboje nedošlo. Takto vzniklá polovodičová struktura se nazývá dioda. Pakliže je dioda připojena tak, aby proud tekla, mluvíme o připojení v propustném směru, v opačném případě o závěrném směru. Průchodem proudu v propustném směru se při rekombinaci elektronů a děr v úzké oblasti P-N přechodu uvolňuje energie. Uvolněná energie vzniká sestoupením elektronu z vyšší energetické hladiny na nižší. Tato energie se uvolňuje ve formě tepla, které dále rozkmitává atomy krystalové mřížky. Za určitých podmínek, jež jsou závislé především na chemickém složení polovodičů, koncentrace příměsových atomů nevlastních polovodičů, šířce P-N přechodu apod., může ovšem vedle tepelné energie vznikat i elektromagnetické záření ve formě viditelného světla (obr. 6). Důležité ovšem je, že tepelné ztráty zde vznikají v každém případě a toto uvolněné teplo má výrazný vliv na stárnutí LED. Cílem je tedy vytvořit takový P-N přechod, kde bude podíl vyzařovaného světla ku velikosti tepelných ztrát největší. [12], [14]



Obrázek 6. Rekombinace elektronů (na obrázku modře) s dírami (na obrázku červeně) [9]

Z obrázku je patrné jak velké energie se v jednotkách eV vyzáří. Jednotlivé frekvence mají různá označení (ν , ν' , ν''), což znamená, že fotony vyzářené od různých elektronů mohou mít odlišné frekvence a tím i vlnové délky a energie. V běžných podmínkách jsou tyto odlišnosti ve vlnových délkách v řádu desítek až jednotek nm, jedná se tedy o téměř nekoherentní světelné záření a vyzařované světlo má téměř čistou barvu. Generované světlo bývá většinou ve viditelné části spektra, může ovšem zasáhnout i mimo něj, do ultrafialové oblasti. Tento způsob získávání světla můžeme označit za elektroluminiscenci. Pro přímé vyjádření možných vlnových délek generovaného světla můžeme použít vztah $\lambda \geq hc/E_g$, kde c je rychlost světla a E_g šířka zakázaného pásu polovodiče. Pro prahové napětí diody U_p pak platí přibližně $U_p \approx E_g/e$, kde $e \cong 1,6 \cdot 10^{-19} C$ je náboj elektronu. Jestliže tedy chceme vytvořit P-N přechod generující světlo potřebné vlnové délky, je šířka zakázaného pásu stěžejní a tím i výběr polovodičů a jejich slitin. [5], [8], [9], [12]

2.3 Konstrukce LED

S polovodičovými světelnými zdroji se setkáváme již přes půl století, a to ve formě polovodičových laserů a elektroluminiscenčních diod neboli LED. Laser je založen na stimulované (vynucené) emisi fotonů, které jsou vyzářeny deexcitací elektronů z metastabilních hladin (mezi stabilní a nestabilní hladinou energie). Principem funkce LED je vznik záření průchodem proudu přes P-N přechod.

Světelné diody prošly od této doby rozsáhlým vývojem a postupem času hrají stále důležitější roli v osvětlovací a signalizační technice. Princip jejich funkce zajišťuje vysokou účinnost až kolem 90 %. Díky minimalizaci tepelných ztrát dosahují tyto zdroje v porovnání např. se žárovkami nebo výbojovými zdroji světla vysoké životnosti. Zatímco u žárovek je životnost kolem 1000 odsvícených hodin při poklesu světelného toku na 70 %, u LED zdrojů jsou některými výrobci uváděny hodnoty až kolem 50 000 odsvícených hodin za ideálních podmínek při poklesu světelného toku na 70 %. Vysoká účinnost je důsledkem relativně malého proudu (v porovnání např. se zdroji založenými na tepelném principu) potřebného k vytvoření žádaného světelného toku.

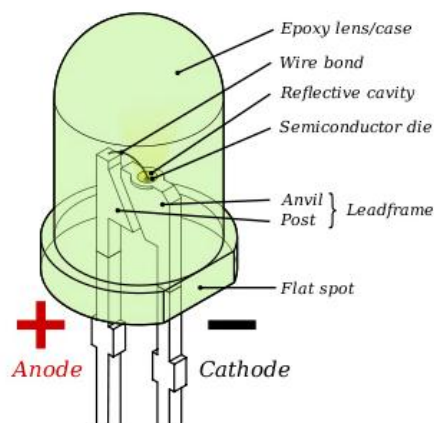
Vlivem vědeckého poznání a technologického pokroku ve výrobě vzrůstá účinnost přeměny elektrické energie na světlo u nově vyráběných LED, proto je jejich budoucnost, coby

světelných zdrojů, perspektivní. Dnes jsou konstrukční provedení LED různá díky rozmanitému použití, avšak určité zákonitosti konstrukce jsou vždy zachovány. [10], [14]

2.3.1 První konstrukční provedení

První světelnou diodu představil v roce 1962 americký elektrotechnik Nick Holonyak Jr. Původní pohnutkou byl v této době nástup nových polovodičových laserů a s tím související výzkumy různých kombinací polovodičů Ge, Ga a As. Holonyak využil v té době nově objevený technologický postup umožňující výrobu kvalitnějšího směsného polovodiče, než byly dosud vyvíjeny, konkrétně se jednalo o slitinu GaAs a GaP. Struktura těchto slitin umožnila posunout spektrum vyzařovaného záření z oblasti infračerveného do oblasti červeného světla, a vznikla tak první LED. [3], [4]

Od tohoto okamžiku se začala vyrábět první konstrukční provedení LED typu DIP (*Dual Inline Package*). U tohoto typu je P-N přechod umístěn na reflektoru a zde je přikontaktován ke dvěma přírodním hliníkovým vodičům, které jsou dnes nahrazeny zlatými drátky kontaktovanými termokompresí. Celek je pak zalitý v kompaktním plastovém pouzdru, které ovlivňuje úhel vyzařování a chrání polovodičový čip před účinky vnějšího prostředí (obr. 7).

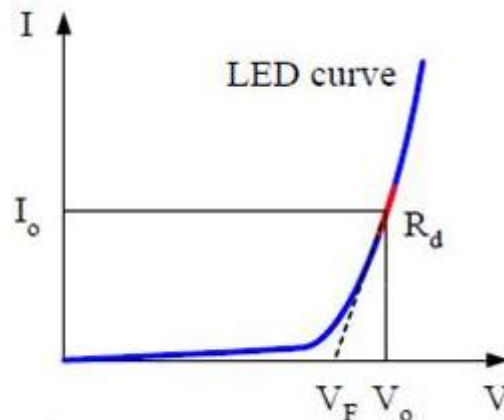


Obrázek 7. Konstrukční provedení typu DIP [6]

Nevýhodou této konstrukce je nedostatečný odvod tepla z polovodičového čipu. Vývojem a přípravou dalších polovodičů na bázi GaAs a jiných se v následujících desetiletích podařilo zkonstruovat LED diody typu DIP výkonů jednotek až desítek lm/W v barvách červené, žluté, zelené a modré. Dalším krokem pak byla konstrukce tzv. kvartérních polovodičů (struktura tvořená slitinou čtyř základních polovodičů, což umožnilo variabilnější využití zakázaného pásu a lépe si odpovídající kombinace krystalových mřížek) a s tím související rozmach využití LED v osvětlovací a signalizační technice. Konstrukční typy DIP se pro své jednoduché provedení a nenáročnou údržbu v signalizační technice používají dodnes. [7], [3]

2.3.2 Emitované spektrum záření a voltampérová charakteristika LED

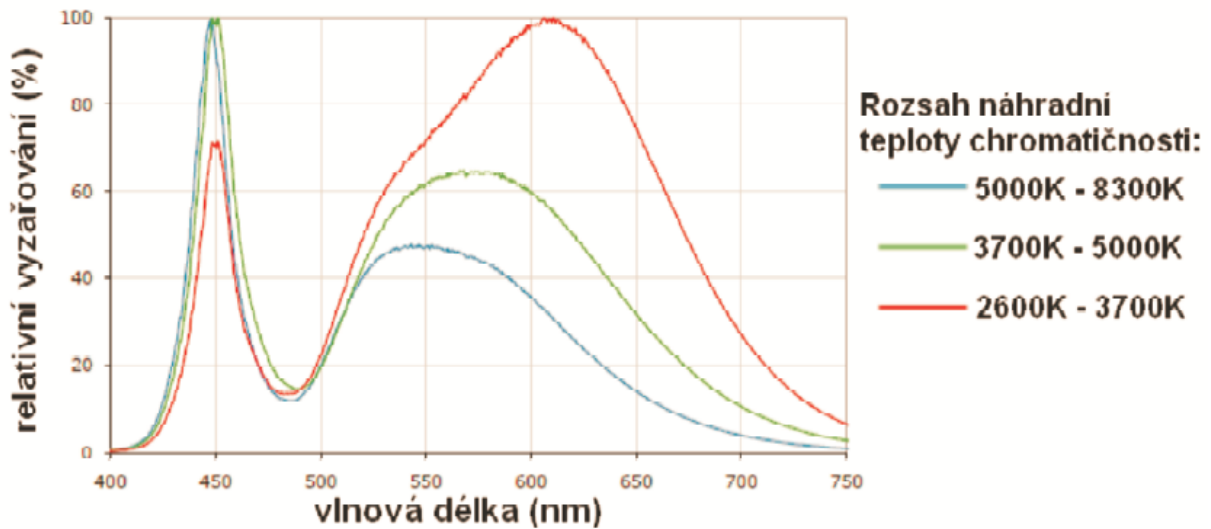
Každá elektronická součástka má svou Volt-ampérovou charakteristiku zobrazující průběh proudu jako funkci přiloženého napětí na součástce. LED jako polovodičová dioda není výjimkou. Voltampérová charakteristika LED diod se od obyčejných usměrňujících křemíkových diod liší velikostí napětí v propustném směru (bílé LED i více než 2,5 V) a velikostí závěrného napětí, které je u LED cca 5 V (obr. 8).



Obrázek 8. Voltampérová charakteristika LED diody v propustném směru [29]

Na obrázku je červeně zvýrazněna možná pracovní oblast LED, které přísluší pracovní proud I_0 a napětí v pracovním bodě zde značeno V_0 . Směrnici tečny v tomto místě označujeme jako diferenciální odpor nebo též sériový odpor diody. Napětí, které je na obrázku značeno V_F , je tzv. prahové napětí U_p , které udává nejmenší hodnotu přiloženého napětí v propustném směru, kdy dochází k otevření polovodičového přechodu diody. [29], [20]

Vyzařované spektrum světla je pro LED charakteristickou vlastností. V případě monochromatické LED je spektrum emitovaného záření reprezentováno úzkým peakem na příslušné vlnové délce. Pokud jde o výkonné LED čipy obsažené ve svítidlech osvětlovacích soustav, většinou jde o světlo bílé. LED emitují modré až ultrafialové světlo, které je zachyceno luminoforem a dále je vyzařeno v podobě bílého světla. V tomto případě se k peaku přidá ještě širší oblast vzniklá rozptýlením světla v luminoforu a optické čočce. Vyzařované světlo se skládá z luminescence prvotního modrého světla a fosforescence na luminoforu (obr. 9). [1]



Obrázek 9. Závislost relativní intenzity vyzařování na vlnové délce bílých LED pro tři možné teploty chromatičnosti [1]

2.3.3 Provedení efektivního P-N přechodu u LED

Důležité je uvědomit si, že pohyb elektronů a děr v P-N přechodu není způsoben jen elektrickými silami, ale také difúzí úměrnou teplotě P-N přechodu. V oblasti P-N přechodu nevzniká záření vlivem rekombinace v celém objemu přechodu. Záření vzniká pouze v těch částech, kde šířka zakázaného pásu vyhovuje podmínkám vzniku fotonu a tomu je následně umožněno šířit se k vnějšímu povrchu polovodiče. V jiných částech rekombinací dochází pouze k uvolňování tepla, nebo k pohlcení generovaného fotonu. Pro lepší účinnost generování světla v přechodu máme dvě možnosti – zajistit lepší rekombinaci v té části P-N přechodu, která vytváří světlo, nebo eliminovat ty části, v nichž se rekombinací světlo nevytváří. Toho lze dosáhnout různými způsoby. [14]

Základním řešením jsou tzv. dvojité heterostrukтуры. V tomto případě je aktivní zóna P-N přechodu uzavřena mezi dvě obklopující izolační vrstvy, které zde plní funkci omezující oblasti. Jestliže tyto dvě přidané vrstvy mají širší zakázaný pás, než je u aktivní zóny, potom bude zabráněno úniku nosiče náboje (elektrony a díry) z aktivní oblasti do těchto dvou vrstev (obr. 10).

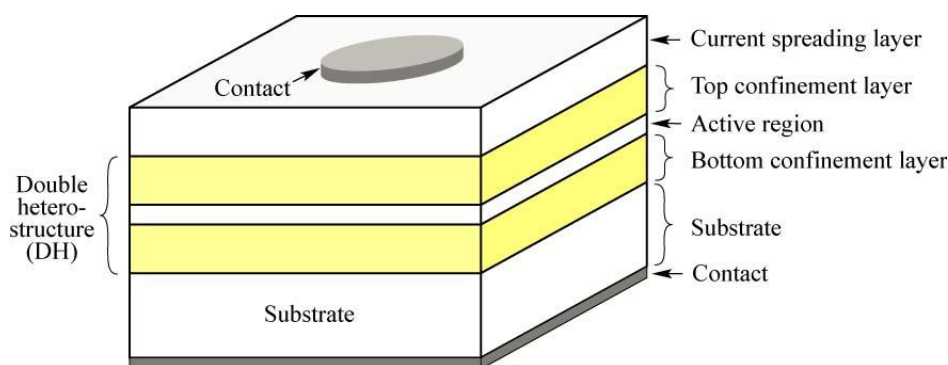


Fig. 7.1. Illustration of a double heterostructure consisting of a bulk or quantum well active region and two confinement layers. The *confinement* layers are frequently called *cladding* layers.

E. F. Schubert
Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press)
www.LightEmittingDiodes.org

Obrázek 10. Schematické uspořádání dvojité heterostruktury [14]

Energie nosičů je menší, než je potřebná energie k překonání rozhraní izolační vrstvy a aktivní zóny. Zároveň ale musí být tloušťka aktivní části dostatečně malá, aby jí nosiče náboje byly schopny difúzí proniknout. Díky tomuto principu je většina nosičů náboje koncentrována v oblasti aktivní zóny P-N přechodu a účinnost využití funkce LED je daleko větší než při jednoduchém P-N přechodu bez vložených izolačních vrstev. Navíc uvolněný foton v aktivní oblasti má menší energii, než je šířka zakázaného pásu okolních polovodičů, a není tak brzděn při průchodu k povrchu. [14]

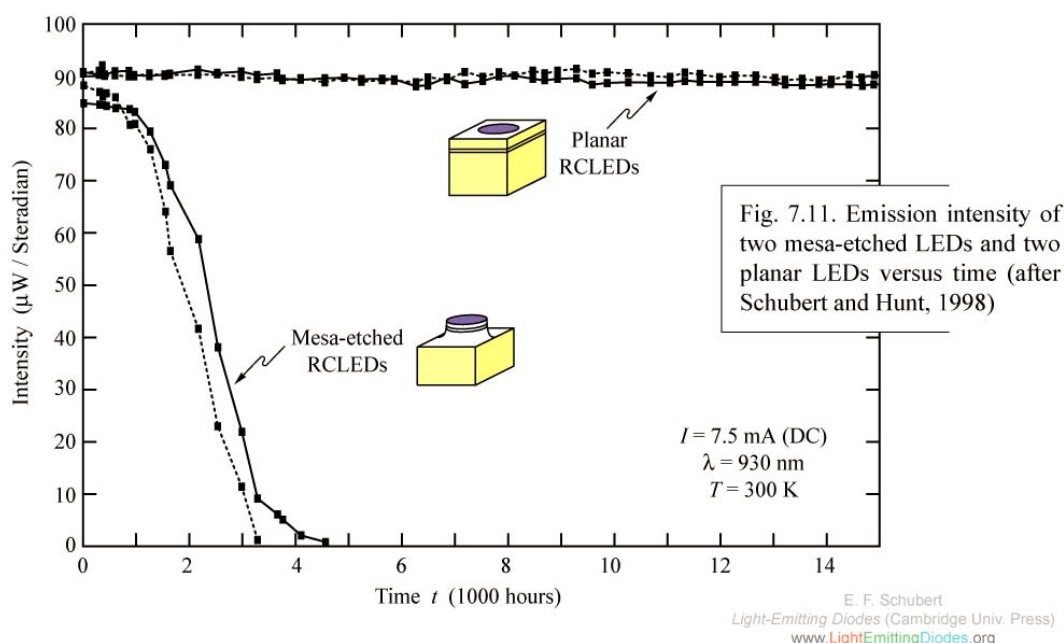
Tímto způsobem je možné koncentrovat nosiče do velmi úzkých prostorů a zmenšit tak i celkový objem aktivní části. Dvojité heterostruktury se tudíž velmi často využívají u výkonových modulů LED. Popsané heterostruktury se dnes na substrát epitaxně nanášejí pomocí MOCVD (*Metal Organic Chemical Vapour Deposition*), tedy kovově-organickými výparů. Šířka aktivní zóny se pohybuje mezi 0,1 až 0,7 μm . Omezením pro spodní hranici tloušťky je možnost nechtěného přetečení náboje při vyšších proudech. [14], [12]

Další možností pro zvýšení efektivity rekombinace a tvorby záření v aktivní části je využití dopantů, příměsí atomů různých prvků pro posílení vlastností polovodiče. Možných dopantů je celá řada, využívají se většinou příměsí kovů (Ag, Au apod.) v závislosti na požadovaných vlastnostech. V případě heterostruktur se spíše dopuje neaktivní oblast a aktivní se ponechá bez příměsí pro zachování efektu heterostruktury popsaného výše. Navíc i při malé koncentraci dopantů v aktivní zóně může dojít k přemístění (posunu) P-N přechodu, což má negativní vliv na funkci heterostruktury. Příkladem dopování aktivní části pro zvýšení efektivity luminiscence heterostruktur mohou být atomy Be ve slitině GaAs. [14]

Při dopování neaktivní části jsou rozhodujícími faktory výsledná rezistivita a koncentrace dopantů. Zvláště důležité je, aby byla dodržena vyšší koncentrace dopantů mimo aktivní zónu, kde téměř vždy alespoň zbytková množství některých dopantů jsou. Pro polovodiče typu N u heterostruktur jsou koncentrace dopantů v rozsahu od 10^{16} do 10^{17} cm^{-3} a u typu P v rozsahu $5 \cdot 10^{17}$ až $2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Výrazný rozdíl ve škálách koncentrací typů P a N je odůvodněn delší střední difúzní drahou elektronů oproti díram. [14]

Důležitou roli hraje též krystalická čistota použitých slitin polovodičů. Pro správnou požadovanou funkci polovodičové struktury musí být nečistoty, dislokace (chybějící souvislá

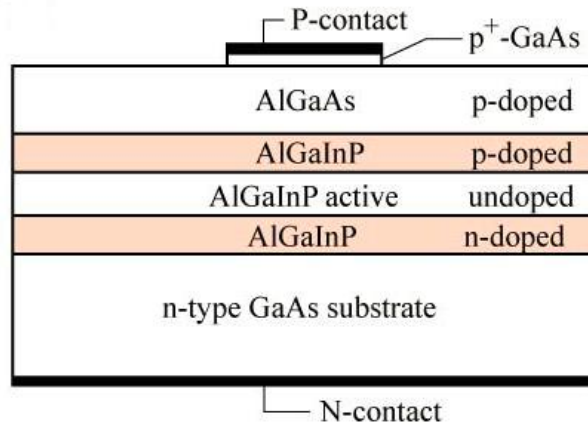
část atomů), vakance (jednotlivé chybějící atomy) a ostatní defekty krystalové mřížky předem eliminovány. Proto by měly mít sousedící vrstvy stejnou krystalovou strukturu a mřížkovou konstantu (definovaná vzdálenost mezi dvěma sousedícími atomy). S tím úzce souvisí i povrchová rekombinace, která probíhá na rozhraní struktur. Díky povrchové rekombinaci se uvolňuje teplo, které je příčinou vzniku těchto defektů krystalové mřížky na povrchu. Tyto defekty se mohou dále šířit a urychlují degradaci LED. Proto je snahou udržet tyto „volné povrchy“ s kladně nabitými částmi molekul vzdálené od místa výskytu nosičů o několik difúzních délek nosičů. Tím pádem jsou elektrony a díry drženy z dosahu těchto povrchů. Výsledkem je tedy výroba spíše planárních struktur, kde je aktivní zóna téměř zcela uzavřena mezi izolační vrstvy (obr. 11), nebo musí být na povrch nanášena vrstva z vhodného materiálu tak, aby k povrchové rekombinaci nedocházelo. [14]



Obrázek 11. Zobrazení průběhů intenzity vyzařování planární struktury dvou LED a dvou tzv. Mesa-etched LED, kde je využito leptání k dosažení výsledné struktury. Na povrchu aktivní zóny může docházet k rekombinaci častěji, než u planární LED. [14]

2.3.4 Uspořádání vrstev LED

Jednotlivé typy LED využívající dvojité heterostruktury mohou být konstruovány v rozličných tvarech. Rozlišujeme např. obdélníkový (planární) tvar, cylindrický, kuželovitý tvar a jiné. Uspořádání a poměrné šířky nanášených vrstev ale mají své zákonitosti. K polovodiči typu P je přiveden záporný pól a k polovodiči typu N je přiveden pól kladný. Plocha kovového kontaktu P bývá menší, než je plocha N kontaktu, a navazuje na vrstvu polovodiče typu P. Ta je tvořena většinou ze slitiny galia a dalších prvků a může být dopována příměsí. Následuje první izolační vrstva, která je dopována typem P, a za ní již aktivní zóna P-N přechodu, která dopována není, nebo jen velmi řídkce. Druhá izolační vrstva je stejného složení jako první, ale dopována typem N. Poslední v pořadí je nejtlustší vrstva slitiny polovodiče typu N, substrát, navazující na plochu kontaktu N (obr. 12).



Obrázek 12. Uspořádání vrstev LED [14]

Substrát bývá často tvořen kromě GaAs i keramikou v podobě oxidu hlinitého, ale může být přítomno i stříbro nebo zlato pro lepší vodivost. Kovový N kontakt může být kromě substrátu přiveden i na druhou izolační vrstvu dopovanou typem N. Takový celek tvořený polovodičovými vrstvami a ohmickými kontakty nazýváme LED čip. Ten je připojen na patici nebo jinou nosnou konstrukci zajišťující pevné spojení se zdrojem energie a LED čipem. Kontakty jsou většinou vytvořeny jako *wire-bond*, tedy jako tenké drátky z dobře vodivého kovu (Cu, Ag, Au), nebo v podobě plošných spojů. Patice slouží jako podkladová vrstva pro odvod tepla přes desku plošného spoje a dále do chladiče. LED čip je jako celek obvykle uzavřen v epoxidovém nebo silikonovém pouzdru, pod kterým bývá v případě bílých LED luminoforová vrstva. Toto pouzdro má kromě ochranné úlohy také funkci optické čočky. [14], [12]

2.3.5 Konstrukční provedení LED čipu pro větší výkony

Konstrukční provedení DIP popsané výše se dnes pro výkonové světelné zdroje LED často nepoužívá. Důvodem je chlazení nedostačující při požadovaných vyšších výkonech. Pro efektivní odvod tepla musí vždy platit, že vytvořené teplo je beze zbytku odvedeno do okolí a v součástce se nikde nekumuluje. Celkový tepelný odpor (daný tokem tepelného výkonu při definovaném teplotním spádu) tvořený přechody mezi substrátem a chladičem, pouzdrum a chladičem a chladičem a okolím musí tudíž být co nejmenší. Toho lze dosáhnout jednak použitím vhodného materiálu, jednak zvětšením plochy teplovodných částí. [6], [3]

Perspektivním řešením je provedení SMD (*Surface Mounted Device*), čili povrchová montáž LED čipu na desku plošných spojů (obr. 13). Čip ve formě heterostruktuře je nakontaktován na třívrstvý hliníkový substrát a zalitý v plastovém pouzdru. Odvod tepla je zajištěn přes větší plochu, než u DIP, a tím je dosaženo lepšího chlazení. Základní vlastností jsou menší rozměry oproti klasické DIP struktuře a využití více možností kontaktování (2, 4 až 6 kontaktů na jeden LED čip). Volit lze také různé vyzařovací úhly a samotná kompaktní LED součástka může obsahovat více LED čipů. Pokud je na součástce LED čipů více, má každý LED čip svoje vlastní přírodní kontakty a tím mohou být separátně napájeny a řízeny jednotlivé čipy. [3], [7]



Obrázek 13. SMD provedení LED součástky [7]

Současným progresivním provedením je tzv. COB (*Chip On Board*) (obr. 14), jež se ve své podstatě neliší od SMD. Jde též o povrchovou montáž LED čipů, ale jedna kompaktní součástka jich může obsahovat desítky až stovky. Výsledný celek se někdy nazývá LED Array a dosahuje tak větších světelných toků než SMD. V zásadě lze mluvit o jednom větším LED čipu. Hlavním rozdílem oproti SMD konstrukci je ale zapojení přívodů. U provedení COB jsou všechny čipy zapojeny do jednoho obvodu se dvěma přívody. Nelze tudíž řídit jednotlivé LED čipy jako tomu jde u SMD, ale celá součástka je napájena z jednoho zdroje. Výhodou může být i lepší chlazení z důvodu použití větší plochy třívrstvého hliníkového pouzdra. [3]



Obrázek 14. Provedení COB [7]

Tyto dva konstrukční typy SMD a COB jsou dnes nejpoužívanější. SMD se konstruuje pro různé druhy světelných zdrojů od bodových až po přímkové a plošné zdroje. Světelný tok je objemově a opticky tvarován reflektory, refraktory a optickými čočkami. Ze spektrálního hlediska pokrývají širokou škálu tónů bílého světla i jednotlivých barev (odstíny červené, modré, zelené, žluté). COB nalézají uplatnění hlavně u bodových svítidel s usměrněným světelným tokem (světlomety a další). Nejmodernější konstrukcí je MCOB (*Multi Chip On Board*), která je tvořena spojením několika součástek COB. [3]

LED součástky SMD i COB se využívají přímo pro výrobu LED zdrojů světla a ke svému napájení potřebují předřadník. Samotným zdrojem je pak buď zdroj stejnosměrného proudu v rozsahu od cca 350 mA do 700 mA, nebo zdroj stejnosměrného napětí v rozsahu 12 V, 24 V a 48 V. U výkonných světelných zdrojů LED je ale lepším řešením zdroj konstantního proudu, jelikož tepelné ztráty nejsou zanedbatelné a při překročení určité teplotní hranice by mohlo dojít k poškození P-N přechodu. Předřadník bývá proto složen z můstkového usměrňovače, stejnosměrného meziobvodu (kondenzátor) a stejnosměrného snižovacího měniče napětí.

LED světelné zdroje můžeme dále dělit na LED moduly a LED zdroje. V případě LED modulů je součástka provedena buď jako SMD, nebo COB a může být použita jako kompaktní celek pro instalaci do svítidla. Neopomíjeným aspektem pro LED čipy v případě výkonných LED modulů je stupeň krytí pro provoz v náročnějším prostředí. LED zdroje jsou obvykle opatřeny patičí zajišťující bezpečnou manipulaci v případě výměny u běžného uživatele. [3]

2.4 Výhody a nevýhody LED

Na základě uvedených principů LED a technologií používaných konstrukčních provedení plynou jistá východiska, jež řadí LED mezi velmi perspektivní světelné zdroje. Díky současným technologickým postupům je dnes možné instalovat LED pro téměř všechny světelné aplikace. Na druhé straně má každý světelný zdroj založený na určitém principu své meze využitelnosti.

2.4.1 Výhody LED

- Vysoká účinnost přeměny elektrické energie (v poměru lm/W) dosahuje ve srovnání s ostatními světelnými zdroji, založenými na tepelném nebo výbojovém principu, maxima. Proud potřebný k dosažení požadovaného světelného toku je oproti ostatním zdrojům minimální. LED tak dosahují hodnot měrného výkonu až 150 lm/W.
- Velmi vysoká životnost v rozsahu 30 000 až 50 000 odsvícených hodin při definovaném poklesu světelného toku na 40 % (někdy se též životnost udává pro 70 % počátečního světelného toku [1]). Počet hodin je ovšem závislý na technologickém provedení, provozním prostředí a výkonu LED.
- Velká účinnost pohybující se až kolem 90 % závislá na technologii výroby a napájení.
- Díky vlastnímu principu funkce jsou LED zdroje odolnější proti častému spínání, než např. klasické žárovky, a hodí se proto do náročnějších signalizačních aplikací.
- LED součástky většinou neobsahují škodlivé látky, i když některé v menší míře ano (As, P apod.). Tyto toxické prvky jsou ale většinou pevně vázány ve slitinách polovodičů a nepůsobují tak vysoké riziko pro životní prostředí.
- Díky absenci UV záření je možné LED využít i k účelům osvětlování objektů, jako jsou různé organické materiály a živé organismy, jinak citlivých na UV záření.
- Technologické prostředky dovolují dosáhnout téměř širokého spektra barev vyzařovaného světla pod téměř jakýmkoli vyzařovacím úhlem. Tím lze dosáhnout efektivního využití světelného toku.
- Svítidla založená na LED technologii dosahují světelných toků srovnatelných nebo vyšších v porovnání se svítidly založenými na klasických zdrojích. Mívají v porovnání menší rozměry.
- Při účinném chlazení nízká provozní teplota LED výrazně přispívá k prodloužení životnosti LED. [10], [11]

2.4.2 Nevýhody LED

- Životnost LED svítidla je velmi závislá na pracovním proudu, jež způsobuje tepelné ztráty, pokud není účinně chlazena. Životnost silně závisí na teplotě okolí. Pro výkonové moduly je tudíž důležité dbát na účinné chlazení.
- Pořizovací náklady ještě většinou převyšují ostatní použitelné světelné zdroje. Vyplývá to z výše pořizovací ceny, která je u LED často několikrát větší než u žárovek a dalších tradičních světelných zdrojů. Cena za jeden lumen bývá tedy u LED větší. [10], [11]
- Ve většině svítidel založených na LED technologii není možné vyměnit poškozené LED a LED moduly.
- V místech, kde je teplota okolí vyšší než 60 °C se jen velmi obtížně dají aplikovat svítidla založená na LED principu, zde budou ještě po dlouhou dobu využívány dosavadní zdroje (žárovky, zářivky s elektromagnetickým předřadníkem, výbojky, halogenové žárovky apod.).
- Životnost LED může být negativně ovlivněna impulzním proudovým namáháním (normy ČSN EN 61347-1, ČSN EN 61347-2-13 týkající se elektronických předřadníků). Může dojít k poškození spojů mezi LED čipem a vývodem.

Z uvedených základních vlastností a omezení LED převažují výhody nad nevýhodami. Nejvýznamnějšími pozitivy jsou vysoká účinnost, životnost a variabilita vyzařovaného světla. Díky těmto vlastnostem nacházejí LED využití v širokém rozsahu působnosti od malých signálků po barevné LED displeje v elektronice a výkonové osvětlovací zdroje. [10]

2.5 Provozní vlastnosti a degradace LED

I přes velmi dlouhé odhadované životnosti LED zdrojů světla, dochází ať už provozem nebo vnějšími vlivy k postupnému stárnutí použitých materiálů a celkové degradaci LED. To lze pozorovat např. poklesem světelného toku, změnou barvy světla nebo úplným selháním LED při provozu. Výkonové LED zdroje jsou využívány v mnohočetných aplikacích a jsou vystaveny různorodým okolním podmínkám. Použití nalézáme v osvětlovací technice domů, bytů, veřejného osvětlení, pracovních prostorů, dopravních prostředků, měřicí technice a mnohé další. Požadovaná funkce LED svítidla v daném prostředí je proto rozhodujícím faktorem pro jeho životnost. Důležitý je jednak protékající proud a tím i chlazení součástek LED, jednak parametry prostředí, jako jsou teplota a její změny, tlak, chemické složení atmosféry, možné mechanické vlivy, vzdušná vlhkost, elektrostatické výboje apod. [11], [20], [25]

2.5.1 Stanovení životnosti LED

U obecného světelného zdroje považujeme za jeho životnost počet odsvícených hodin při definovaném poklesu světelného toku. Většinou se životnost uvádí pro pokles na 70 % nebo 40 % počátečního světelného toku. Pod pojmem degradace tedy primárně rozumíme snížení této doby pod hranici danou výrobcem. Nesmíme ale opomenout i jakékoli jiné trvalé změny ve spektrálním složení emitovaného světla. Jednotlivé zdroje nejsou totožné, proto je potřeba pro měření životnosti při daných podmínkách změřit určité minimální množství vzorků. Potom

stanovíme životnost statisticky jako střední hodnotu s výpočetní odchylkou. V případě výkonových modulů LED byly zavedeny mezinárodní normy pro uvádění výrobku na trh a měření životnosti LED. Normy lze nalézt pod označením IEC 62717 *LED modules for general lighting* týkající se LED modulů pro všeobecné osvětlování a část IEC 62717-2-1 *Luminaire performance* týkající se zvláštních požadavků na LED. Dále norma IEC 62722 se standardem označeným LM-80 uvádí zkušební metody a minimální zkušební čas 6000 hodin u LED, kdy je světelný tok zaznamenáván každých 1000 hodin a hodnoty jsou dále extrapolovány (matematicky predikovány za hranici měřeného časového intervalu) podle daných metod směrnice IES TM-21. [15]

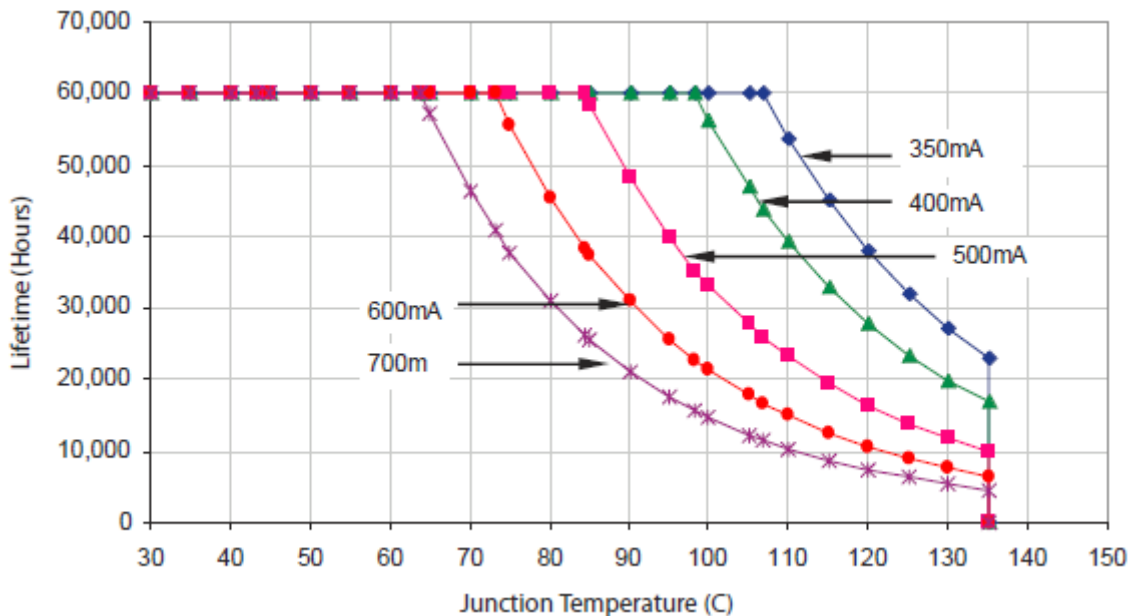
V normě IEC 62717 byla zavedena metrika pro „střední životnost“. To je doba, která uplyne, dokud 50 % použitých LED svítidel dosáhne stanoveného světelného toku, např. 80 % počáteční hodnoty. LED svítidlo je složené z výkonového modulu, který dále obsahuje buď jednotlivé LED čipy SMD technologie tvořící LED pole, nebo konstrukční provedení výkonového čipu COB. V případě, kdy modul obsahuje více oddělených LED čipů, je třeba zvážit posouzení životnosti celého LED modulu a jednotlivých LED čipů zvlášť. [15], [16]

2.5.2 Degradace vlivem provozu

Předpokládáme, že je LED připojena k proudovému nebo napětíovému zdroji a zkoumejme vliv protékajícího proudu a napájecího napětí na degradaci LED při neměnných pokojových podmínkách. Příkon světelného zdroje je určen těmito dvěma veličinami, na kterých záleží degradační procesy. Přednostním faktorem je protékající proud kvůli tepelným účinkům. [17], [20]

Protékající proud je příčinou vzniku tepelných ztrát úměrných kvadrátu velikosti proudu a celkového odporu $R_c i^2$. Do celkového odporu můžeme u dvojitých heterostruktur zahrnout odpor kontaktů, odpor izolační části a odpor aktivní zóny P-N přechodu (označován také jako sériový odpor diody). Uvolněné teplo aktivní zóny vzniká v důsledku dvou dějů. První z nich je nezářivá rekombinace v oblasti aktivní zóny, druhou je povrchová rekombinace. Četnost těchto jevů s proudem narůstá a podíl nosičů náboje procházejících úzkou aktivní zónou se snižuje (podíl zářivé rekombinace klesá). Při zvyšování proudu dochází tedy k uvolňování tepla a tím i zvýšení teploty P-N přechodu. Při malých prouděch jsou Jouleovy ztráty na kontaktech a v izolačních vrstvách heteropřechodu nízké a většina tepelných ztrát pochází z aktivní zóny nezářivé rekombinací. Při vyšších hodnotách proudu se již mohou parazitní odpory znatelněji projevit a tvořit i dominantní složku celkových tepelných ztrát. [18], [27]

Zvýšení teploty má zásadní vliv na několik parametrů součástky, z nichž nejdůležitějšími jsou kvalita a kvantita emitovaného světla LED a její životnost. Z hlediska kvantity vyzařovaného světla LED je známo, že s rostoucí teplotou světelný tok a tím i intenzita vyzařovaného světla klesá. Ztráty jsou větší a účinnost LED se tím snižuje. Nárůst teploty se též projevuje zužováním zakázaného pásu v aktivní zóně a tím dochází k posuvu vyzařovaných vlnových délek (dominantních vrcholů) do delších vlnových délek a tím i změně barvy LED. Posledním aspektem je životnost, která od určité kritické teploty P-N přechodu klesá velmi rychle. Na obrázku (obr. 15) níže jsou znázorněny změřené závislosti životností LED na teplotě P-N přechodu při určitých prouděch. [18], [17]



Obrázek 15. Životnost výkonných LED čipů v závislosti na teplotě P-N přechodu pro různé velikosti napájecích proudů [17]

V tomto případě jsou teploty tak vysoké, že dochází k trvalým změnám parametrů LED. Se změnou teploty přechodu se mění i degradační mechanismy jednotlivých částí diody, zejména degradace pouzdra postupně vedoucí k úplnému selhání LED. Pouzdro ztrácí svou schopnost efektivního odvádění tepla a důsledkem toho mohou v P-N přechodu vznikat trvalé defekty (poruchy krystalové struktury přechodu a dalších částí) díky kumulaci tepla a tím zvýšené teploty. [17], [21], [24]

S rostoucí teplotou a přítomnou vlhkostí se mohou do degradačních mechanismů zařadit i některé chemické procesy. Například u bílých LED využívajících luminofory na bázi fosforu může dojít k chemickým reakcím s polovodičovým čipem nebo pouzdrem, které se za nižších teplot neuskutečňují. Průběh těchto reakcí závisí na protékajícím proudu, použitých materiálech a teplotě. [22], [24]

2.5.3 Účinky prostředí

Životnost svítidla založeného na technologii LED může být ovlivněna následujícími faktory: teplotou okolí, použitými materiály v konstrukci svítidla, prostředím ve kterém pracuje (vliv chemických látek) a technologií výroby (při procesu pájení apod.). Z konstrukčních materiálů svítidla se mohou v případě plastu uvolňovat zpomalovače hoření. Z některých materiálů použitých jako těsnění se uvolňuje síra v podobě organických sloučenin.

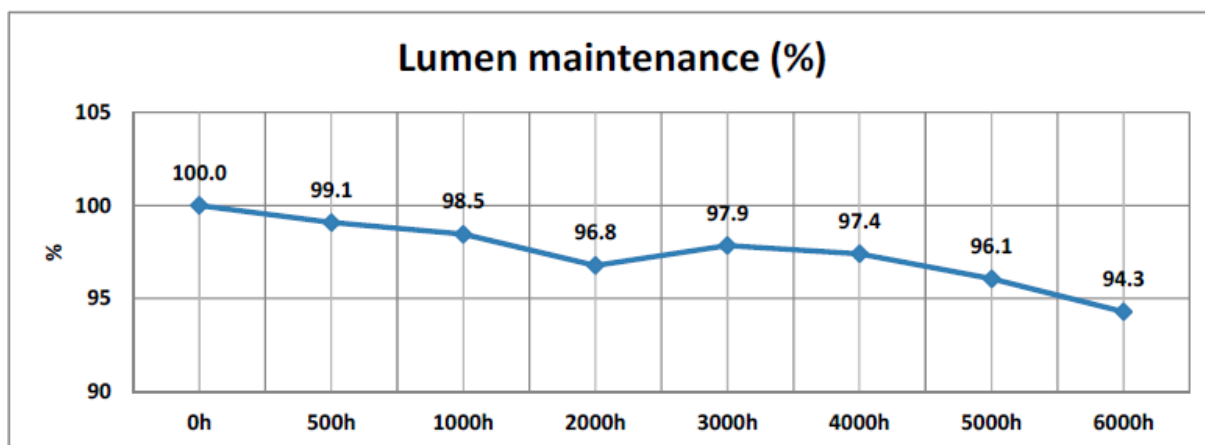
2.5.4 Degradace vlivem vysokých okolních teplot

U světelných zdrojů založených na tepelném principu se pohybují pracovní teploty vlákna kolem 3000 °C a u výbojových světelných zdrojů jako jsou zářivky pak kolem 80 až 120 °C a u

výbojek až kolem 500 °C. V těchto případech bývá tato teplota o mnoho vyšší, než je teplota okolí. To u LED světelných zdrojů často nemusí platit. Výkonové LED pracují s provozními teplotami P-N přechodu od 50 °C k až kolem 100 °C, přitom tato teplota nemůže být vyšší než 130 °C, kdy se taví pouzdrící hmoty. Klíčovými faktory pro efektivní chlazení a správnou funkci LED jsou dobře provedený chladič systém (závislý na tepelných odporech mezi LED čipem a pouzdrém a dále pak mezi pouzdrém a chladičem) a nízká okolní teplota oproti pracovní teplotě světelného zdroje. Teplo je v LED odváděno z P-N přechodu do pouzdra a dále přes chladič do okolí a je úměrné zápornému gradientu teploty. Je tudíž zřejmé, že pro nejefektivnější chlazení LED je potřeba dosáhnout co nejnižších okolních teplot. Při osvětlování prostorů s vysokými okolními teplotami, řádově desítek a stovek °C a více (např. trouby, vyhřívací pece, průmysl, hutě apod.), již LED zdroje očividně nenalézají uplatnění. [20]

U polovodičových součástek je tedy rozhodující teplota P-N přechodu, která se u LED při provozu pohybuje do maximální hodnoty 120 až 130 °C. Teplota okolí významně ovlivňuje chladič proces, jenž je dále silně závislý na materiálu pouzdra, materiálu chladiče a celkové chladič ploše (tepelné odpory). Pouzdro je vyrobeno většinou z plastu (epoxidové, silikonové) a LED čip je v něm hermeticky uzavřen. Při zvyšování teploty okolí bude měrný výkon odváděného tepla klesat a součástka se začne přehřívat. To má za následek pokles světelného toku s časem. [20]

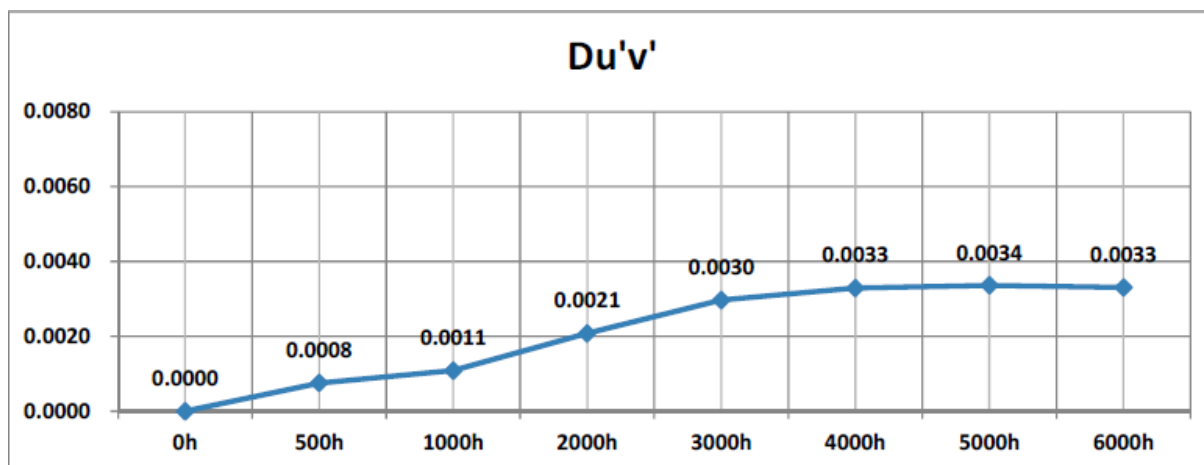
Podle mezinárodní normy LM-80-80 se teplotní zkoušky provádí při 55 °C, 85 °C a třetí teplotu volí pracovník sám (většinou 105 °C). Měření se provádí minimálně pro dobu 6000 hodin a hodnoty se zaznamenávají každých 1000 hodin. Níže na obrázku je příklad změřené závislosti světelného toku při teplotě okolí kolem 55 °C u 25 vzorků vybraných LED čipů (obr. 16). Test byl proveden firmou SAMSUNG ELECTRONICS Co., Ltd. v souladu s normou, vzorky byly napájeny napětím 3,5 V a protékající proud činil 1 A. [19]



Obrázek 16. Pokles světelného toku 25 LED čipů při teplotě kolem 55 °C a protékajícím proudem 1 A na vzduchu při relativní vlhkosti 11,3 % [19]

Celkový světelný tok vybraných LED čipů se po 6000 hodinách o více než 5 % snížil a lze očekávat, že by pokles mohl být při vyšších teplotách výraznější. Je mnoho degradačních mechanismů probíhajících při vyšších teplotách. Jmenujme například nárůst povrchové rekombinace, mechanické poškození vlivem rozdílných koeficientů teplotní roztažnosti použitých materiálů, vznik poruch v krystalové struktuře polovodiče a další. [20]

Dalším měřeným parametrem je spektrum vyzařovaného světla, které se při vyšších teplotách posouvá směrem k UV oblasti. Dále je na obrázku (obr. 17) u změřených vzorků při teplotě 55 °C stejného testu patrná změna vyzařovaného spektra. [19], [23]



Obrázek 17. Závislost posunu chromatičnosti 25 vzorků LED čipů při teplotě kolem 55 °C s protékajícím proudem 1 A na vzduchu při relativní vlhkosti 11,3 % [19]

Parametr $Du'v'$ vyjadřuje změnu barvy chromatičnosti od původní hodnoty vzorků. Tato změna udává posun k zeleným barvám. Je tudíž zřejmé, že při vyšší teplotě se povaha vyzařovaného světla mění. U vyšších teplot lze očekávat markantnější vývoj těchto diferencí ve vyzařovaném spektru a tím rychlejší degradaci součástky. [20]

2.5.5 Působení chemických látek

LED diody jsou vůči provoznímu prostředí chráněny pouzdem, které je vystaveno působení mnoha vnějších vlivů. Kromě tepelného a mechanického namáhání může docházet k chemickým reakcím materiálů pouzdra a dalších odkrytých částí LED s různými plynnými složkami obsaženými v atmosféře. Tyto složky mohou svou reaktivitou významně ovlivnit očekávanou životnost LED svítidla. Mezi tyto reaktanty řadíme různé plyny (oxid siřičitý, sirovodík, chlor a další), vzdušnou vlhkost, toxické sloučeniny a také některé organické těkavé složky. Anorganické složky mohou pak se vzdušnou vlhkostí výrazně ohrozit povrchy použitých materiálů zejména kovových částí LED světelného zdroje. [25]

Přirozené chemické složení atmosféry je závislé na lokálních klimatických podmínkách, nebo je dáno provozem-výrobou v osvětlovaných prostorech v případě továren, laboratoří apod. V druhém případě lze rozdělit osvětlované prostředí na třídy podle čistoty od velmi znečištěných prostor (kovohutě, továrny atd.) až po prostory velmi čisté jako nemocnice (i zde může dojít k poklesu životnosti LED vlivem chemických polutantů z léčiv atd.), výroby elektroniky a jiné. [25]

Z hlediska konstrukce LED součástky bychom mohli usuzovat, že organické plynné složky budou reagovat s organickými materiály použitými v součástce. Jednalo by se hlavně o pouzdro, které bývá vyrobeno z anorganicko-organických materiálů (silikony). Studie od firmy SAMSUNG ELECTRONICS uvádí různé látky jako toluen, aceton, fenol, halogenové deriváty a další

sloučeniny v podobě organických kyselin (kyselina octová) a jiné. Bylo prokázáno, že tyto látky chemicky napadají pouzdro, jehož povrch tímto způsobem koroduje. [31], [30]

Samotný LED modul může také obsahovat těkavé organické složky, označovány VOC (*Volatile Organic Compounds*), v podobě pojivých materiálů a těsnění. Ty se mohou v případě vyšších teplot nebo špatně větraných prostor uvolnit a difundovat do polymerových struktur pouzdra nebo čočky. Díky chemické stálosti silikonového pouzdra se zde tyto látky v blízkosti povrchu usazují. Tímto způsobem mohou zásadně ovlivnit kvalitu vyzařovaného světla (obr. 18). [26], [25]

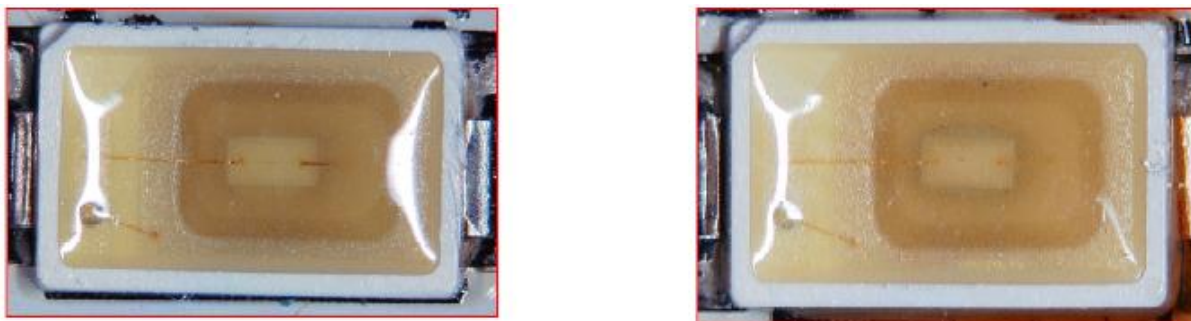


Obrázek 18. Vlevo je LED čip v normálním stavu, vpravo byl čip vystaven působení VOC při vysokém světelném výkonu při jmenovitých teplotách prostředí [26]

U anorganických látek vyskytujících se v ovzduší můžeme spíše očekávat chemickou reakci s anorganickými materiály LED součástky. Jedná se tedy hlavně o použité kovy v podobě přívodních kontaktů, pájených spojů, vodivých lepidel, substrátu a další části jako je např. kovový rám pouzdra (u některých typů LED je přítomen malý plochý kov obepínající pouzdro zespod), který je tvořen slitinou stříbra a dalších kovů. V LED technologiích je využíváno pro kontakty hlavně stříbro, zlato a měď nebo jejich slitiny. Povrchy těchto kovových součástí mohou být molekulami anorganických sloučenin chemicky napadeny a tak dojde ke korozi povrchu. Z vyjmenovaných kovů je nejméně chemicky odolné stříbro, lze tudíž očekávat, že části LED vyrobené ze stříbra (rám pouzdra, substrát, vodivá lepidla, kontakty apod.) budou přednostně reagovat se sírou. Naproti tomu jsou zlato a měď chemicky odolnými kovy. [20], [25]

Za možné anorganické reaktanty, jež se mohou v přítomnosti LED světelného zdroje vyskytnout, jsou považovány zejména oxidy síry, oxidy dusíku, sloučeniny chloru a sirovodík. Se všemi těmito plyny se lze setkat, ať už ve venkovním prostředí nebo ve výrobnách a laboratořích, s největší pravděpodobností. Například oxid siřičitý můžeme detekovat ve městech a v průmyslových oblastech všude, kde dochází ke spalování pohonných hmot a uhlí. [25], [28]

Stříbrné části LED napadáno sírou a sirnými sloučeninami a vzniká nejčastěji sulfid stříbrný. Tento jev se často nazývá sulfurizace, tedy korozní napadení součástky sírou, a u LED se objevuje zejména u stříbrného rámu pouzdra (obr. 19). Sulfid stříbrný má černou barvu a díky tomu může zásadně ovlivnit barvu vyzařovaného světla. Měřením byl prokázán i pokles světelného toku v důsledku sulfurizace. [25]



Obrázek 19. Vlevo je LED po sulfurizaci a je vidět patrné tmavší zabarvení kolem LED čipu, vpravo je LED v normálním stavu [30]

Projevem sulfurizace není pouze snížení světelného toku a znečištění svítidla označováno jako diskolorizace. V případě koroze přírodních kontaktů může dojít i ke změně elektrických parametrů LED. Elektrický odpor takto poškozených kontaktů se může zvětšit a tím vzrostou úbytky napětí a ztráty. Mění se tudíž i tvar Voltampérové charakteristiky. LED se začne vlivem tepelných ztrát přehřívat a celková účinnost klesne. Díky zvětšenému odporu struktury s kontakty se může rapidně zmenšit protékající proud při jmenovitém napájecím napětí. Důsledkem toho světelný tok výrazně poklesne. [30]

Kromě síry může se stříbrem také velmi dobře reagovat chlor za vzniku chloridu stříbrného. Chemické prvky a sloučeniny, se kterými bude stříbro dobře reagovat, je celá řada (Br, I, F, dusičnany a další), ty se ale již tak běžně nevyskytují. Měření ukázala, že při průchozím proudu se koroze materiálu kontaktů urychluje. To může být způsobeno větší teplotou, která chemické reakce podpoří. Dalším aspektem je vzdušná vlhkost, která v kombinaci s chemickým působením anorganických plynných složek může značně urychlit degradační mechanismy. Například při reakci molekul vody s oxidem siřičitým vzniká kyselina siřičitá chovající se ke stříbru (i k mědi) velmi agresivně. Může se také stát, že látky za sucha pro LED nepřiliš agresivní mohou se vzdušnou vlhkostí vytvořit pro LED smrtící kombinaci. [31]

2.5.6 Koncepce experimentů

Dosavadní experimenty týkající se ohrožení odhadované životnosti LED světelných zdrojů byly prováděny v době trvání několika tisíc hodin, pokud šlo o tepelné účinky, několik stovek hodin, pokud šlo o jiné vlivy prostředí, chemické. V obou případech šlo většinou o zkoumání závislosti poklesu světelného toku a tím životnosti v časovém intervalu řádově srovnatelném s odhadovanou normální dobou života LED. Tím bylo zkoumáno stárnutí LED v globálním měřítku.

Pokud bychom si kladli za cíl najít hranice provozních podmínek za účelem úplné rychlé destrukce LED, je potřeba zvýšit náročnost podmínek a snížit zkušební dobu. Volbu doby vystavení těmto pro LED extrémním faktorům je třeba odhadnout tak, aby se prokazatelně projevil změny parametrů LED. Zároveň je potřeba dobu působení faktoru příliš nepřesáhnout, aby změny těchto parametrů byly nadále měřitelné. V případě těchto měření lze tedy očekávat, že doba degradace bude mnohonásobně menší, než je koncipována pro měření životnosti v předešlých situacích, kdy jsou jednotlivě zkoumány dlouhotrvající vlivy podmínek prostředí.

Lze tedy očekávat, že odhadované doby vystavení vlivům prostředí mohou spadat do časových intervalů několika desítek až stovek hodin.

3. Prováděné experimenty

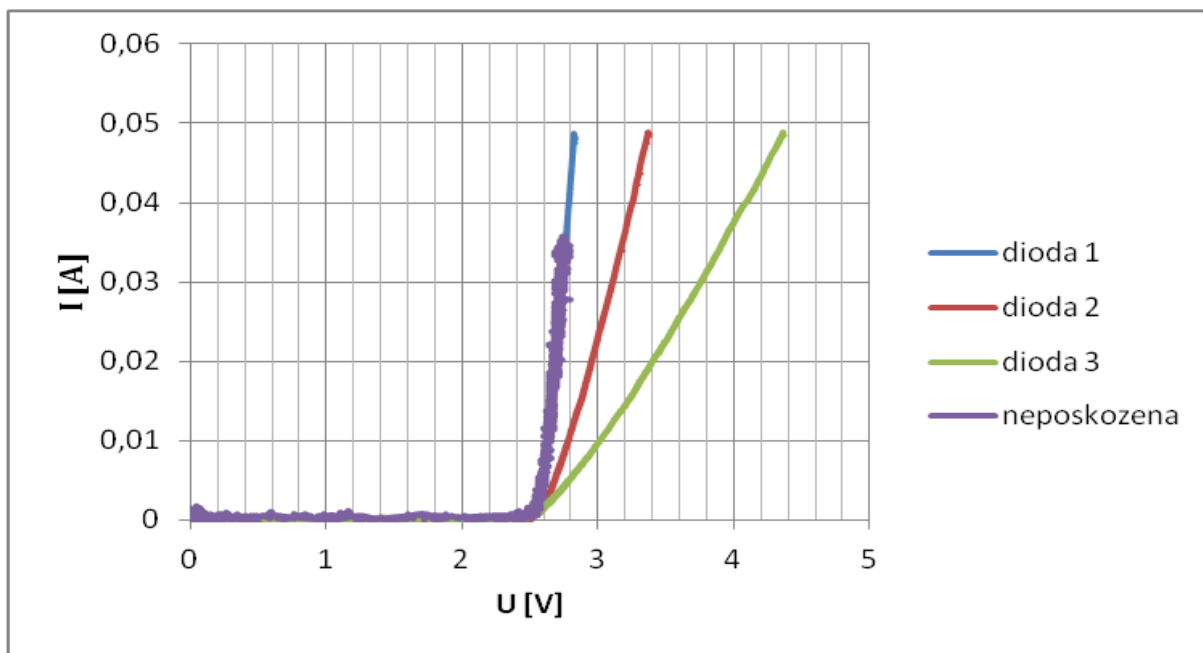
3.1 Výběr experimentálních metod

Na základě výše uvedených předpokladů jsem zvolil pro ověření degradace tepelné namáhání při vysokých okolních teplotách a chemické působení jednak při nezatěžovaných diodách, jednak při protékajícím proudu. Pro reprezentaci chemického působení na degradaci jsem vybral oxid siřičitý. Důvodem jsou jeho častý výskyt v průmyslových a obydlených oblastech, snadná dostupnost a také bezpečnější manipulace oproti jiným chemickým kandidátům (H_2S , Cl_2 ...). Kvůli extrémnosti podmínek a také z časových důvodů jsem volil časové intervaly vystavení LED čipů degradačním vlivům v řádu stovek hodin.

3.1.1 Předěšlé experimenty s oxidem siřičitým

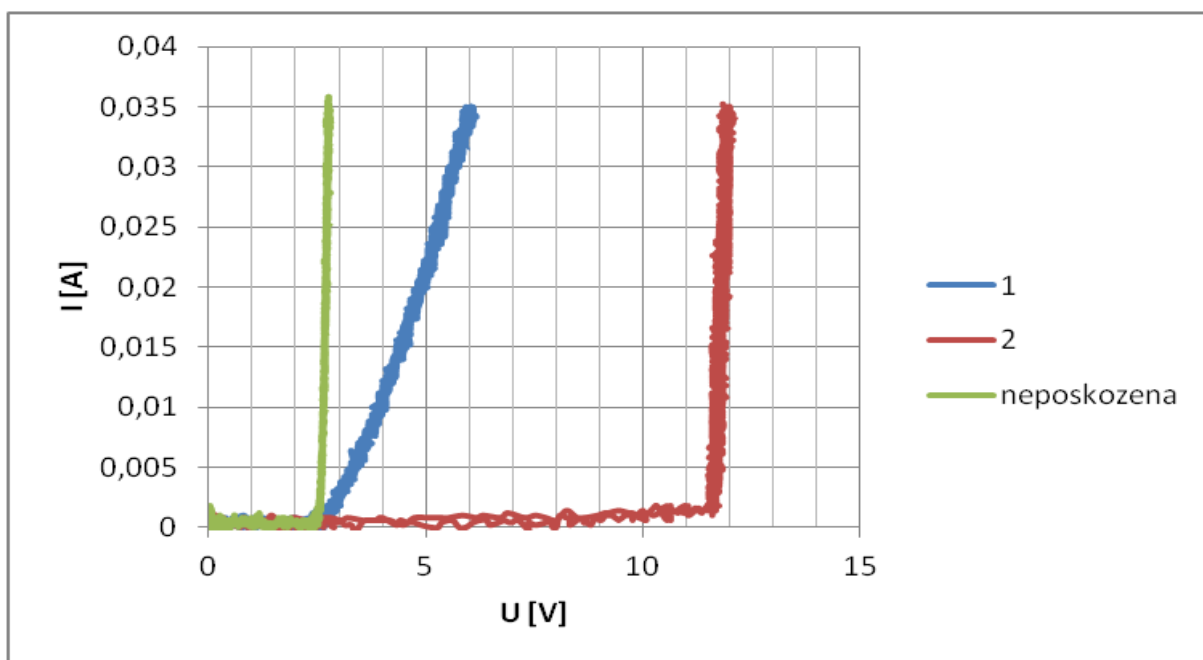
S oxidem siřičitým byly provedeny experimenty degradace několika LED modulů a pásků ve speciální komoře Liebisch KB 300, sloužící především ke korozním zkouškám materiálů [33]. Tyto zkoušky nebyly provedeny přímo v souladu s normou ČSN EN 60068-2-42, která se týká zkoušek vlivu oxidu siřičitého na kontakty a spoje, ale pouze jako orientační měření. Moduly byly po dobu asi tří týdnů vystaveny nedefinované koncentraci SO_2 (v řádu stovek ppm až jednotek tisíc ppm) při nízké vlhkosti. Použitá komora je staršího data výroby, a jelikož šlo o komoru určenou pro korozní zkoušky, neumožňuje přesně dávkovat koncentraci plynu, ani vlhkosti (ve jmenované normě je relativní vlhkost zadána přes 90 %). Podmínky byly tedy spíše nahodilé.

U těchto vzorků již bylo vizuálně patrné (některé LED čipy změnilly barvu a přívodní kontakty byly často výrazně porušeny), že došlo k rozsáhlé degradaci. Měřením voltampérových charakteristik vybraných diod bylo zjištěno, že některé diody byly ovlivněny (obr. 20). Měření, jehož výsledky jsou zachyceny na obrázku č. 20, bylo provedeno na jednom LED modulu. Z výsledků je patrné, že provedení pouzdra LED není stejné. Některé LED zdegradovaly více.



Obrázek 20. Změna ve voltampérových charakteristikách diod na LED modulu [33]

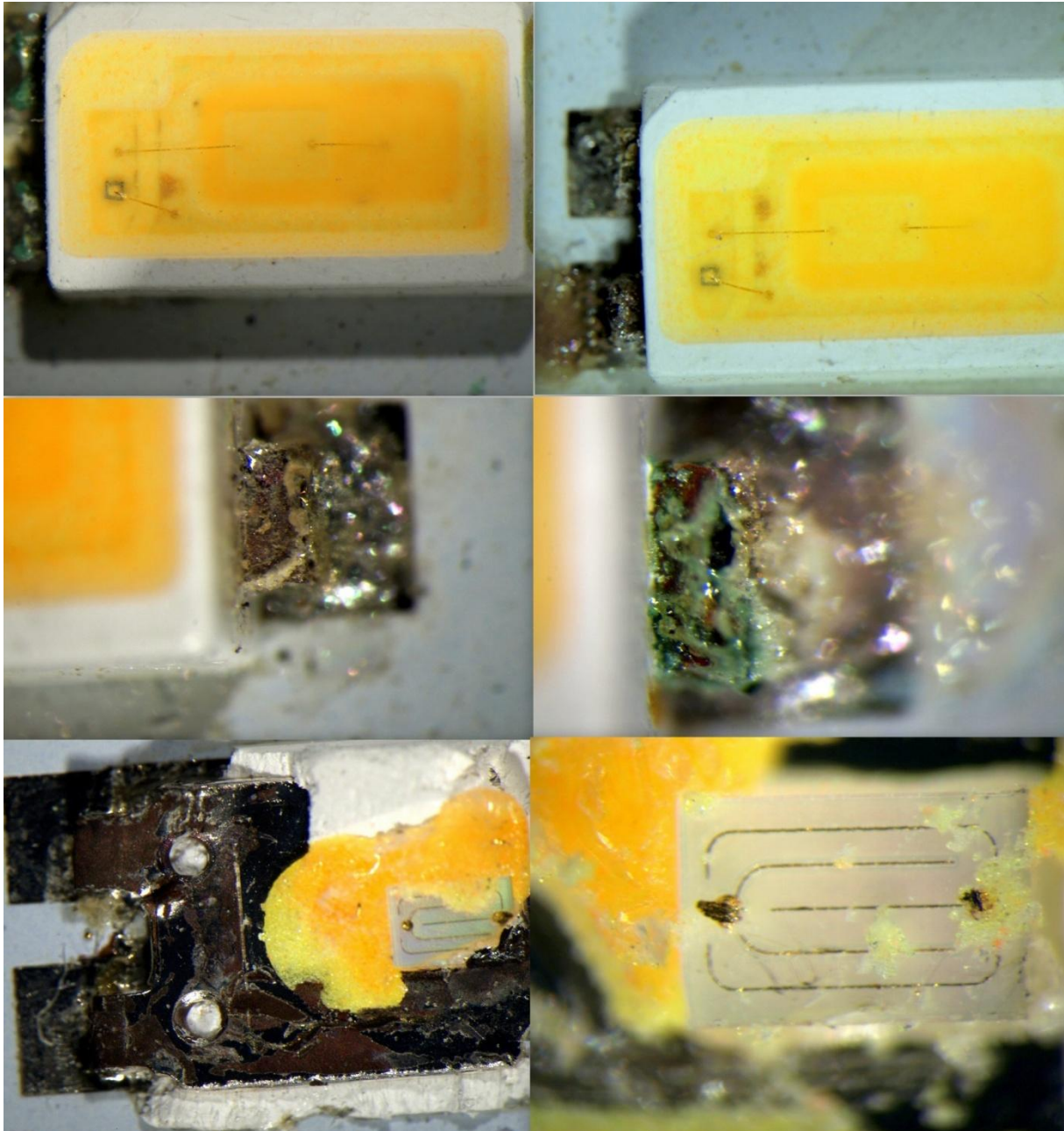
Takové změny nastaly u některých diod na modulech. Kromě těchto modulů byly do komory vloženy i některé jiné LED moduly. U nich došlo k procesům, že se některé LED již dostaly za hranici svého životního cyklu (obr. 21).



Obrázek 21. Změna ve Voltampérových charakteristikách diod na LED pásku [33]

Jak je vidět z příloženého grafu, dioda, jejíž charakteristika je zobrazena červeně, se otevřela až při napětí kolem 12 V. U diody reprezentované modrou barvou se propustná větev charakteristiky sklonila, což je patrné i na předešlém obrázku. Zdá se tedy, že sériový odpor vzrostl.

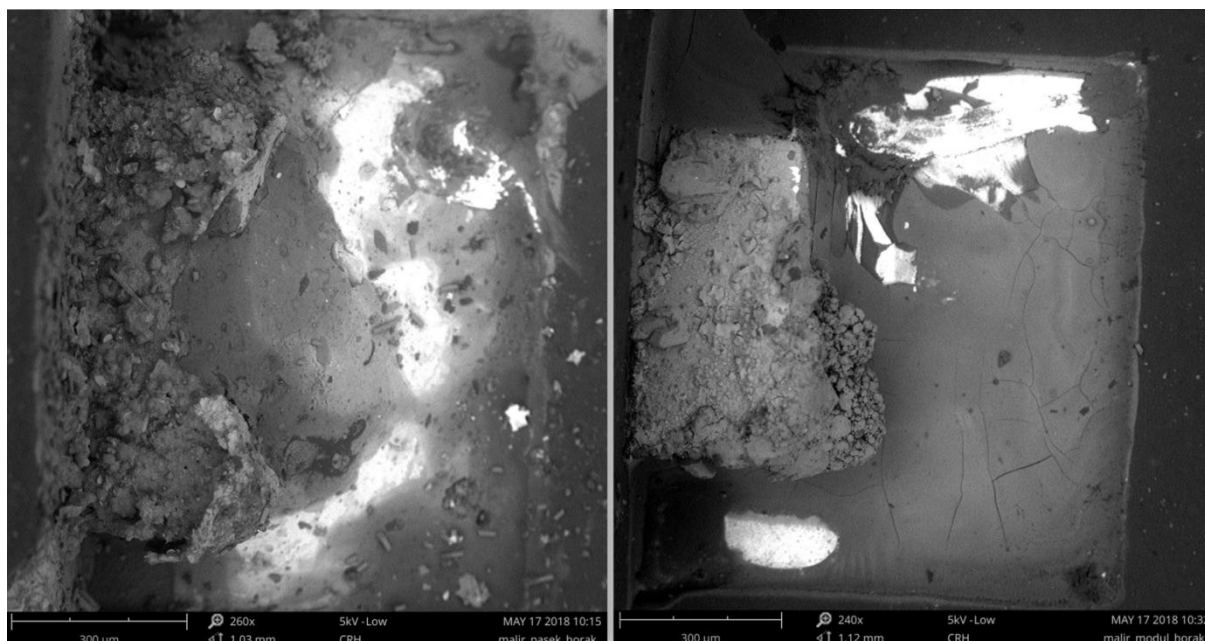
Pod optickým mikroskopem bylo možné si lépe prohlédnout rozsah poškození. Na následujícím obrázku je postupně zobrazen detail dvou degradovaných diod i s pouzdem, dále poškozené přívodní kontakty a nakonec detail samotného stříbrného substrátu a LED čipu (obr. 22).



Obrázek 22. Horní dva obrázky reprezentují poškození pouzdra, prostřední dva přívodní kontakty a dole je zobrazen detail substrátu a LED čipu [33]

Na prvních dvou obrázcích můžeme vidět malé hnědé skvrny poblíž zlatého drátku a křemíkové diody. Ty jsou nejspíše způsobeny reakcí stříbra substrátu se sírou, složky síry se tedy dostaly až k samotnému čipu. Původně pájené kontakty na dalších dvou obrázcích vykazují značnou povrchovou poruchu, zdá se, že stříbro zcela zreagovalo. Zelená barva dokazuje přítomnost mědi. Po odkrytí plastových částí pouzdra (poslední dva obrázky) se ukázalo, že substrát byl z velké části poškozen.

Dále je ještě zobrazen detail z elektronového mikroskopu, který jsem pořídil z degradovaných vzorků (obr. 23).



Obrázek 23. Detail původního pájeného kontaktu, vlevo z LED pásku, který byl po vystavení oxidu siřičitému ještě vystaven tepelně-vlhkým podmínkám, vpravo kontakt LED modulu vystaveného pouze oxidu siřičitému.

V obou případech, ať už bez dodatečného vlivu vlhkosti a tepla, nebo bez něj, došlo zřejmě k započatí úplného rozpadu původních pájených kontaktů. Zásadní roli zde sehrála agresivní reakce síry a stříbra, ale vyloučena není ani reakce s mědí.

3.1.2 Vzorky použité ve vlastních experimentech

Jako vzorky jsem měl k dispozici moduly 280x66 mm od firmy Vyrtých a. s. o třech paralelních řadách, kde v každé řadě bylo jedenáct sériově zapojených diod (obr. 24). Maximální povolené napětí dané výrobcem činilo 34 V a proud 500 mA. Datum výroby těchto modulů se lišilo někdy až o rok, lze tedy očekávat, že by se mohly objevit některé odlišnosti během stárnutí. Veškeré moduly ovšem nebyly před experimenty používány.



Obrázek 24. Používaný modul Vyrtých 280x66 mm, U_{max} 34 V, I_{max} 500 mA, t_{cmax} 80 °C

Tyto moduly byly použity pro veškeré tepelné zkoušky. Tedy jednak bez napájení volně uložené k působení suchého tepla, jednak napájené vystavené týmž podmínkám. Dále byly využity pro zkoumání účinků tepla a vlhka. V případě působení oxidu siřičitého bylo třeba užších modulů kvůli uložení do skleněných válců. Proto jsme s kolegou u několika výše popsaných modulů jednu řadu LED uřízli a vyrobili tak tzv. redukované moduly, které už bylo možné do válců vložit (obr. 25).



Obrázek 25. Upravený modul pro skleněný válec

Pro experimenty s oxidem siřičitým jsme ještě vybrali malé LED pásy také od firmy Vyrtych a. s. s rozměry 280x24 mm a s maximálním napětím 23 V, maximálním proudem 650 mA (obr. 26). Na pásku je řada dvaatřiceti LED uspořádaných do osmi paralelních větví po čtyřech čípech.



Obrázek 26. LED pásek, U_{max} 23 V, I_{max} 650 mA, t_{cmax} 85 °C pro použití do válců

Tyto LED pásy byly společně s redukovanými moduly ukládány do válců s oxidem siřičitým. Vždy se jednalo o SMD LED čipy a všechny tyto uvedené LED zdroje světla se dnes běžně využívají v osvětlovací technice.

Všechny vzorky byly opatřeny dvěma dvojicemi svorek pro přivedení napájecího napětí. Jednotlivé LED čipy všech použitých vzorků měly k sobě antiparalelně připojenou obyčejnou křemíkovou diodu. Ta sloužila pro případ připojení opačné polaroty zdroje k přívodním svorkám.

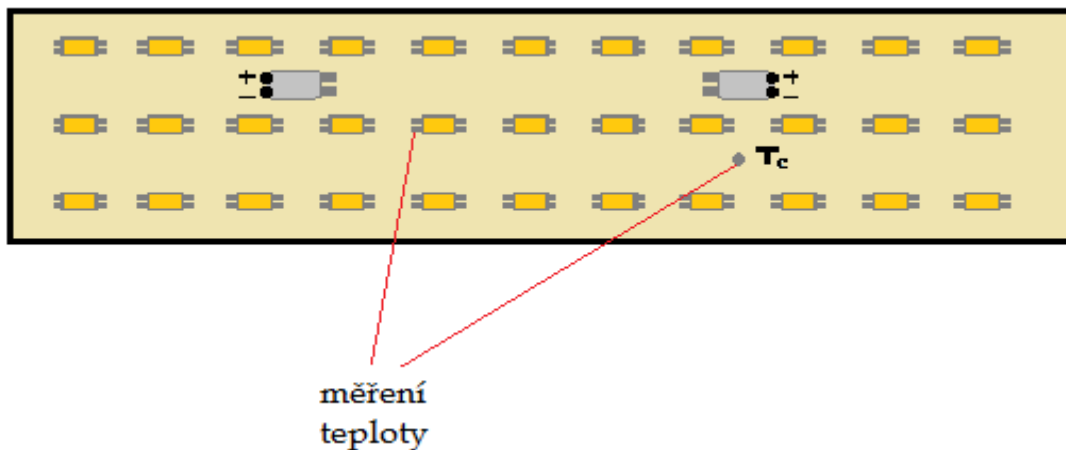
3.1.3 Tepelné namáhání nenapájených LED při minimální vlhkosti

V tomto případě jsem vystavil pět modulů působení teploty 120 °C za sucha bez připojení ke zdroji. K degradaci LED by mělo tedy přispět pouze a jenom nadměrné okolní teplo. Pro simulaci těchto podmínek jsem využil speciální komory, Sušárny s označením FED 720 – WTB binder, určené právě k tepelnému namáhání vzorků. Komora umožňovala nastavení teploty, která byla automaticky udržována, a vnitřní ventilátory zajistily rovnoměrné prohřátí zkušebního prostoru.

3.1.4 Tepelné namáhání napájených LED při minimální vlhkosti

Dalších pět modulů bylo vystaveno stejné teplotě ve stejné komoře, avšak nyní byly tyto moduly připojeny ke zdroji konstantního proudu a napětí. Zdroj zahrnoval dva předřadníky napájené ze sítě vyrobené pro LED svítidla. Čtyři z modulů byly paralelně připojeny k jednomu z předřadníků poskytující celkový proud 350 mA, takže se proud jimi rovnoměrně rozdělil. Každým ze čtyř modulů tak teklo přibližně 70 mA (změřená hodnota jednoho z modulů před vložením do komory činila 87,3 mA). Zbýlý modul byl připojen k druhému driveru a protékal jím proud téměř 300 mA (změřená hodnota před vložením do komory činila 301,0 mA). Takovýmto způsobem lze posoudit působení proudu při extrémní teplotě okolí k degradaci LED.

Na modulu, který byl připojen samostatně k driveru, byla ještě termočlánkem měřena teplota a to na dvou místech. Na bodě označeném výrobcem T_c , jež k tomuto účelu slouží, a dále na pájeném kontaktu vybraného LED čipu (obr. 27). Lze tak zjistit, jak protékající proud přispívá ke kumulaci tepla.



Obrázek 27. Měření teploty termočlánkem na přívodním kontaktu LED a v bodě T_c na modulu 10

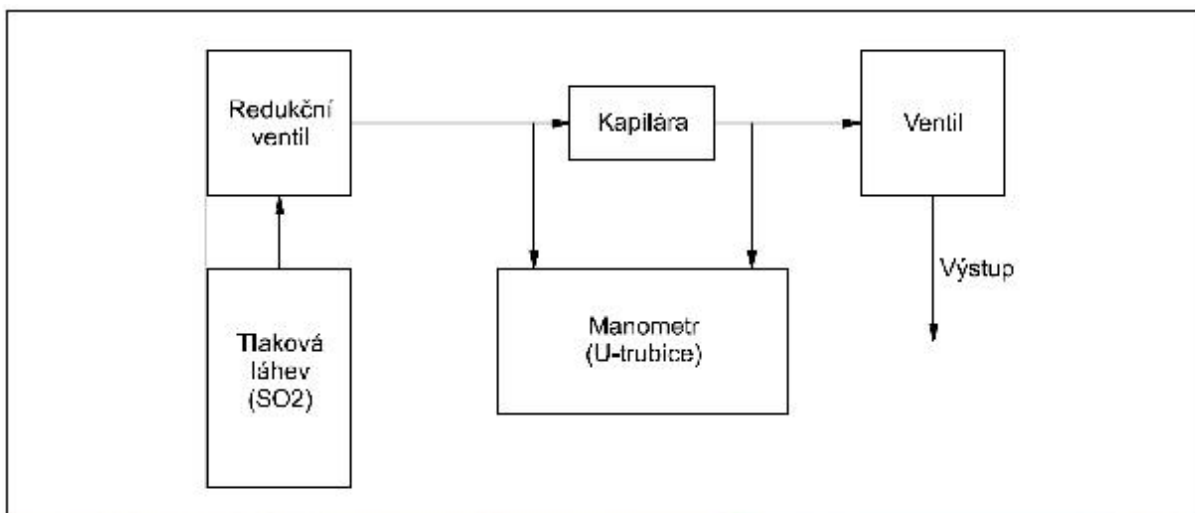
3.1.5 Tepelné namáhání s vysokou relativní vlhkostí

Další pětice modulů byla umístěna do speciální Klimatické komory CTS 10/200 simulující teplé a vlhké prostředí. Ta umožnila nastavit, měřit a udržovat teplotu a relativní vlhkost. Teplota byla udržována na 85 °C a relativní vlhkost vzduchu činila 85 %, zkouška tudíž byla prováděna podle norem ČSN EN 61215 ed. 2 a ČSN EN 61646 ed. 2 (pro stanovení odolnosti vůči dlouhodobému pronikání vlhkosti pozemních fotovoltaických modulů, udaná teplota se nesmí měnit více než o +/- 2 °C a relativní vlhkost se nesmí měnit o více než +/- 5 %, zvýšená teplota zde má urychlit působení vlhkosti). Používané LED moduly nebyly napájeny a byly v komoře pouze volně uloženy. Teplota byla zvolena nižší než u suchého tepla, jelikož nemá mít rozhodující degradační účinek, ale pouze urychlovala působení vlhka.

3.1.6 Působení oxidu siřičitého na zhasnuté LED a následné působení vlhkosti

Ani zde nešlo o soulad s normou ČSN EN 60068-2-42, ale pouze o zjištění skutečného působení SO₂ na životnost LED. Pro tento experiment bylo potřeba zajistit několik opatření. Především manipulace s oxidem siřičitým není zdaleka komfortní a bylo nutné vymyslet postup, jak se s ním co nejméně dostat do přímého kontaktu. K dispozici jsme měli starší bombu s oxidem siřičitým s redukčním ventilem. Pro tento případ nebylo možné měřit světelný tok degradujících pásků a redukovaných modulů jako u tepelných zkoušek, tedy přerušit degradaci, jelikož nebylo možné zajistit opakovatelnou koncentraci oxidu a pokračovat v experimentu při stejných podmínkách. Možností bylo zkusit oxid nadávkovat do uzavřených objemů a měnit jeho koncentraci. To by umožnilo zjistit alespoň degradační stupňovitost koncentrací oxidu siřičitého.

Připravili jsme aparaturu, s jejíž pomocí bylo možné částečně regulovat průtok oxidu siřičitého z plynové bomby. Byla složena ze staršího manometru, skleněných a plastových trubic a padesátilitrové plastové konve (obr. 28). Příprava a provedení experimentu přesto musely probíhat ve vnějším areálu fakulty.



Obrázek 28. Sestavená aparatura sloužící k přesnějšímu dávkování oxidu siřičitého

Následně jsme podle manometru nastavili konstantní průtok speciálně upravenou kapilárou, na které vznikla tlaková ztráta měřená pomocí manometru. Oxidem jsme naplnili odměrný válec a měřili čas. Díky tomuto postupu jsme byli schopni do konve vpravit různé koncentrace oxidu siřičitého. Zvolili jsme koncentrace 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm a 2000 ppm. Díky znalosti objemového průtoku oxidu a objemu konve jsme tak těchto koncentrací s rezervami dosáhli.

Vzduch má relativní molekulovou hmotnost kolem 29, zatímco oxid siřičitý kolem 64 a má při běžných laboratorních podmínkách přibližně dvojnásobně větší hustotu než vzduch [32]. Za těchto předpokladů jsme počítali s tím, že oxid nebude po ustálení několika desítek sekund z otevřené konve příliš ucházet.

Když byla konev s válcem naplněna příslušným množstvím oxidu, nechali jsme oxid v uzavřené konvi ustálit, aby byla koncentrace oxidu v celém objemu homogenizována. Poté

jsme konev otevřeli a do otevřeného skleněného válce v ní jsme vložili několik označených modulů. Válec jsme ještě v konvi ihned utěsnili dvěma silikonovými zátkami. Takto jsme připravili celkem čtyři skleněné válce naplněné oxidem s přibližnou hodnotou výše uvedených koncentrací (obr. 29).



Obrázek 29. Utěsněné válce s oxidem siřičitým koncentrací 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm, 2000 ppm

Je nutné uvést, že mnoho faktorů během tohoto experimentu nehrálo v náš prospěch. Například se oxid rozpouštěl ve vodě (bylo by lepší použít parafinový olej, v němž se SO_2 nerozpouští, ten ale nebyl k dispozici), která byla využita jako médium při plnění odměrného válce a obsažena byla i v manometru, takže bylo třeba odhadnout okamžik, kdy byl roztok nasycen a oxid se již nerozpouštěl. Dalším byl fakt, že konev byla v průběhu plnění oxidem a během vkládání modulů do válce na vrchu zcela neuzavřená. Mluvit tudíž o přesnosti koncentrací nemá žádný význam a jejich hodnoty jsou pouze orientační. Proto byly voleny s dostatečně velkým rozdílem, aby jejich případný degradační vliv byl porovnatelný.

Po uplynutí zhruba 160 hodin jsem moduly a pásky z válců vyjmul a změřil světelný tok a spektrum emitovaného světla. Z toho bylo možné usoudit, zdali oxid siřičitý nějak významně ovlivní parametry LED bez zvýšené teploty a vlhkosti.

Následně byly moduly vloženy do již výše zmíněné speciální komory simulující teplé a vlhké prostředí. Teplota byla nastavena na 85 °C a relativní vlhkost činila 85 %. Těmto podmínkám byly moduly vystaveny několik dní a poté byly některé parametry opět proměřeny. Pokud by se projevily výraznější změny těchto parametrů, lze vyvozovat, že některé části zbytkových množství siřičitých složek na modulu vytvořily za tepla s vlhkostí rychlejší průběh degradace.

3.1.7 Měřené a posuzované parametry

K posouzení stupně degradace modulů jsem zvolil měření změn vyzařovaných spekter a měření relativního poklesu světelného toku. Světelný tok i spektrum byly vždy měřeny při konstantním napětí a proudu, aby mohly být výsledky považovány za relevantní. Dále bylo možné proměření voltampérových charakteristik několika vybraných LED na každém modulu

k posouzení degradace jednotlivých diod. Zatímco světelný tok a spektrum byly nezávislé na zapojení diod v modulu nebo pásku, měření voltampérové charakteristiky nešlo provést u LED pásků. Po přiložení sond generujících napěťové pulzy k jedné LED se otevřely i další diody v jednom sériovém řetězci. Proto jsem měřil voltampérové charakteristiky jen na modulech, kde napětí nestačilo k otevření ostatních.

V případě měření světelného toku a spekter byly vždy měřeny celé moduly nebo pásky LED. To znamená dvě omezení. Prvním je, že změna těchto parametrů může být dána i degradací jiných částí LED zdroje, než jen degradací LED čipů. Druhým je, že ze změřených parametrů nelze usoudit, jaké množství a které LED ze zdroje degradovaly. Zato měření voltampérové charakteristiky bylo prováděno na každé LED jednotlivě a je tak možné zjistit, byl-li konkrétní čip poškozen a rozsah tohoto poškození. Z každého modulu bylo vybráno deset LED čipů, u kterých jsem proměřil voltampérovou charakteristiku.

Světelný tok jsem měřil s pomocí kulového integrátoru a jednoho referenčního zdroje. Ten byl kalibrován a byl u něj znám světelný tok $1508 \text{ lm} \pm 6 \%$ při jmenovitém napětí 230 V a proudu 0,437 A. Ve výsledcích jsem počítal pouze s procentuální změnou světelného toku měřených vzorků, proto jsem referenční zdroj použil pouze k ověření měření kulového integrátoru a k jeho kalibraci. Pro měření světelných spekter jsem využil přenosný spektrometr nastavený vždy ve stejné geometrii vzhledem k měřenému vzorku. Voltampérové charakteristiky jsem měřil pomocí speciálně upraveného přípravku (obr. 30.), který pracoval s proudovými pulsy a výsledný graf zaznamenal osciloskop a s naměřenými hodnotami proudů a napětí bylo možné dále pracovat.

U tepelných zkoušek bylo možné moduly vyjmout, změřit světelný tok a opět je uložit do komor. Z časových důvodů a nedostatečných možností jsem měřil světelný tok většinou v dvoudenních až čtyřdenních intervalech. Světelné spektrum a voltampérové charakteristiky jsem proměřoval pouze před vystavením vzorků a po ukončení experimentů. Světelný tok tedy reprezentuje degradační procesy i v průběhu a světelné spektrum a voltampérová charakteristika odhaluje pouze celkovou degradaci z hlediska celého experimentu. U vzorků ve skleněných válcích s oxidem siřičitým nebylo možné z časových důvodů po proměření v experimentu pokračovat.



Obrázek 30. Přípravek sloužící k měření Voltampérových charakteristik

Posledním vyhodnocením byla vizualizace poškozených LED pomocí elektronového a optického mikroskopu. Porovnáním snímků LED před degradací a po ní umožnilo lépe specifikovat možnou příčinu poruchy pouzdra, přívodních kontaktů případně čipu. Zejména jsem se zaměřil hlavně na přívodní kontakty, kde bylo lépe viditelné případné poškození povrchu pájeného kontaktu. V případě méně patrných poruch jsem ještě uvedl detail kontaktu nepoškozené LED.

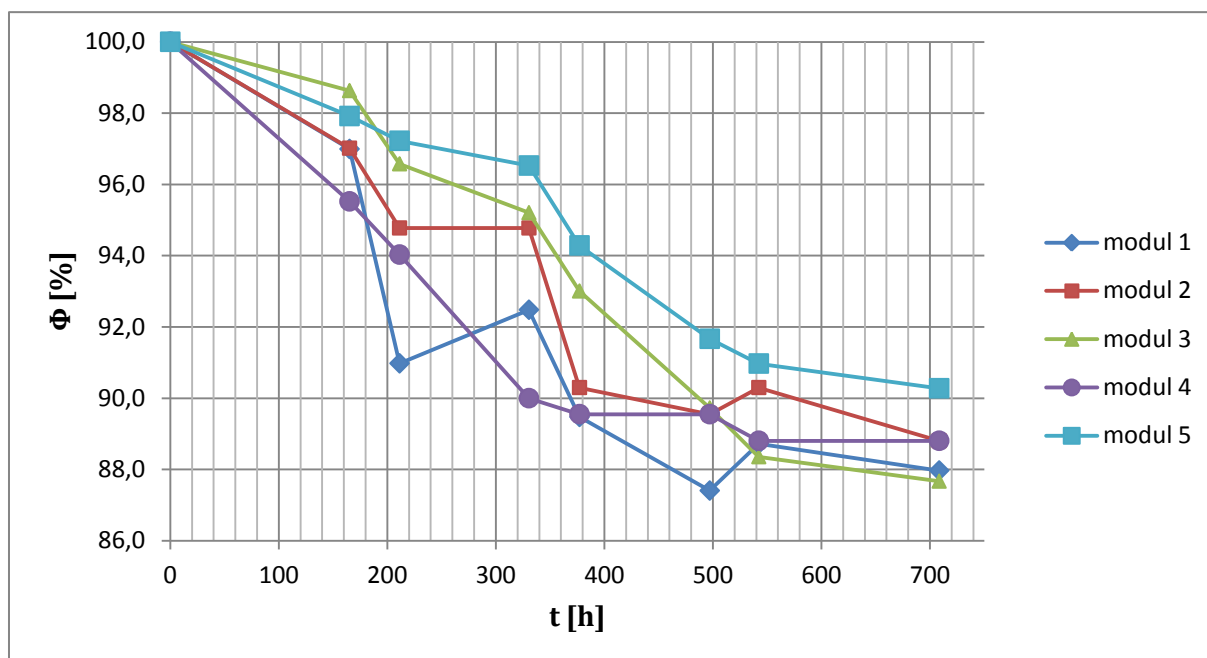
3.2 Výsledky experimentů

Níže jsou reprezentovány změřené parametry degradovaných LED modulů a pásků. Světelný tok je v případě většího počtu hodnot (u tepelných zkoušek a tepelně-vlhkých zkoušek) vynášen také graficky jako změna v procentech původního světelného toku před degradací v závislosti na době vystavení. Ta je přepočítána na hodiny. Světelný tok a jeho pokles jsem uváděl u všech měřených vzorků. Změny ve spektrech a voltampérových charakteristikách byly často u měřených vzorků nepozorovatelné, proto jsem je uváděl pouze u těch vzorků, kde došlo k měřitelným posunům a bylo možné uvážit nějaké degradační procesy. Zkoušel jsem vždy všechny diody na všech modulech, ale žádné významné změny zde neproběhly, proto jsem zde žádné změřené voltampérové charakteristiky neuváděl.

3.2.1 Tepelné namáhání nenapájených LED při teplotě 120 °C

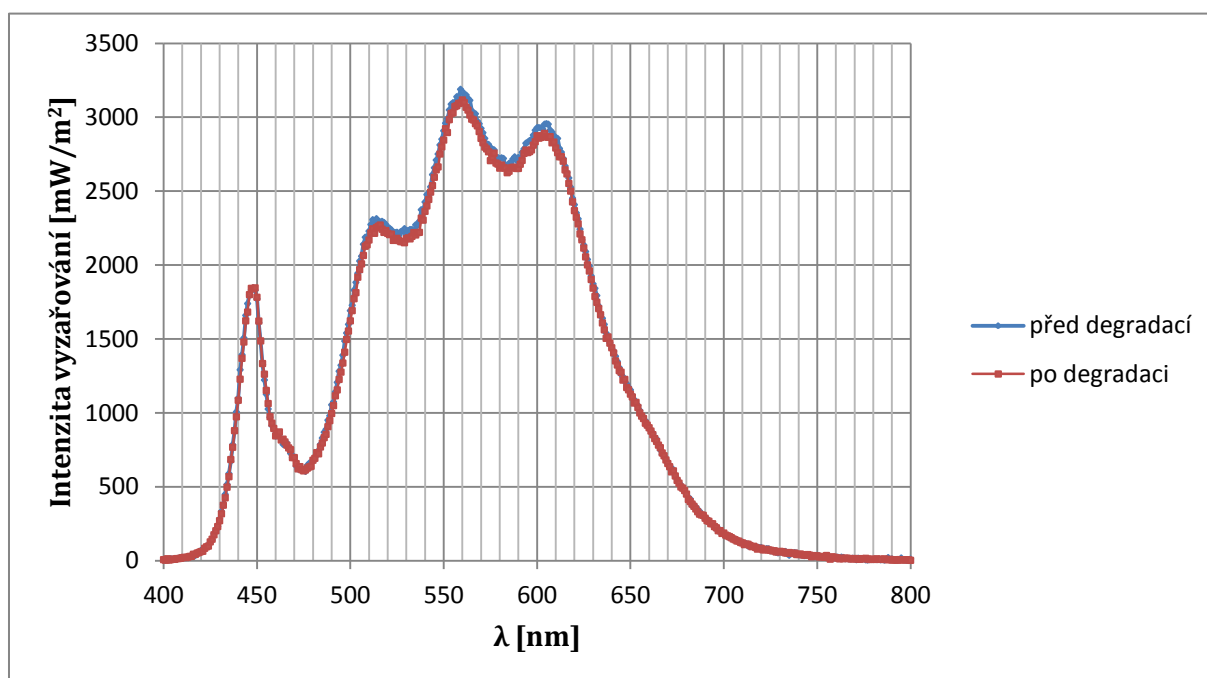
Vzorky byly vystaveny teplotě 120 °C přibližně po dobu 30 dnů, což byla celkově nejdelší zkušební doba prováděných experimentů. Světelný tok byl zaznamenán v několikadenních intervalech a při každém měření světelného toku byly moduly z komory vyjmuty. Níže je

uvedena grafická závislost poklesu světelného toku v procentech na měřeném čase (obr. 31). Počáteční hodnota naměřená před degradací odpovídá hodnotě 100 %.



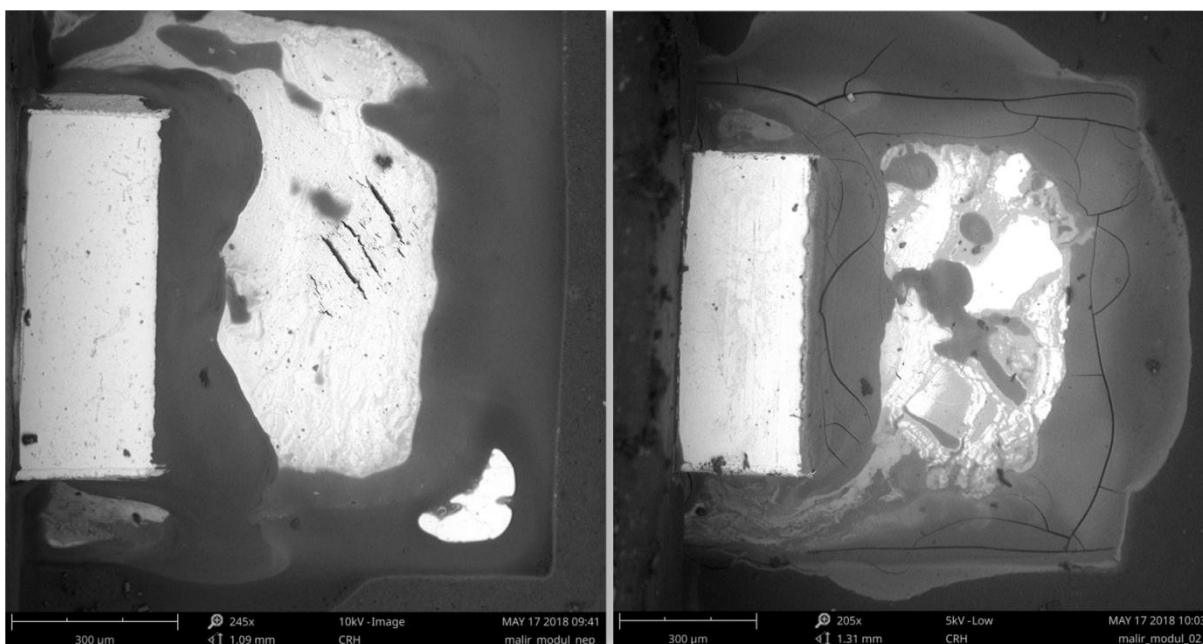
Obrázek 31. Závislost poklesu světelného toku na čase zhasnutých vzorků vystavených teplotě 120 °C

Změřené spektrum těchto pěti modulů se ve všech případech téměř nezměnilo (pouze se nepatrně posunulo k nižším hodnotám intenzit vyzařování, což nehraje významnější roli, uvažujeme-li jako změnu posun hodnot ve směru pro danou vlnovou délku). Níže je uvedeno spektrum modulu 5 změřené před degradací a po ní (obr. 32). Vlnová délka v jednotkách nanometrů je nanesena na vodorovné ose a na svislé ose je vynesena intenzita vyzařování.



Obrázek 32. Změna ve spektru modulu 5, modrá barva reprezentuje spektrum před degradací, červená po degradaci

Níže na obrázku je zobrazen detail pájených kontaktů LED (obr. 33).



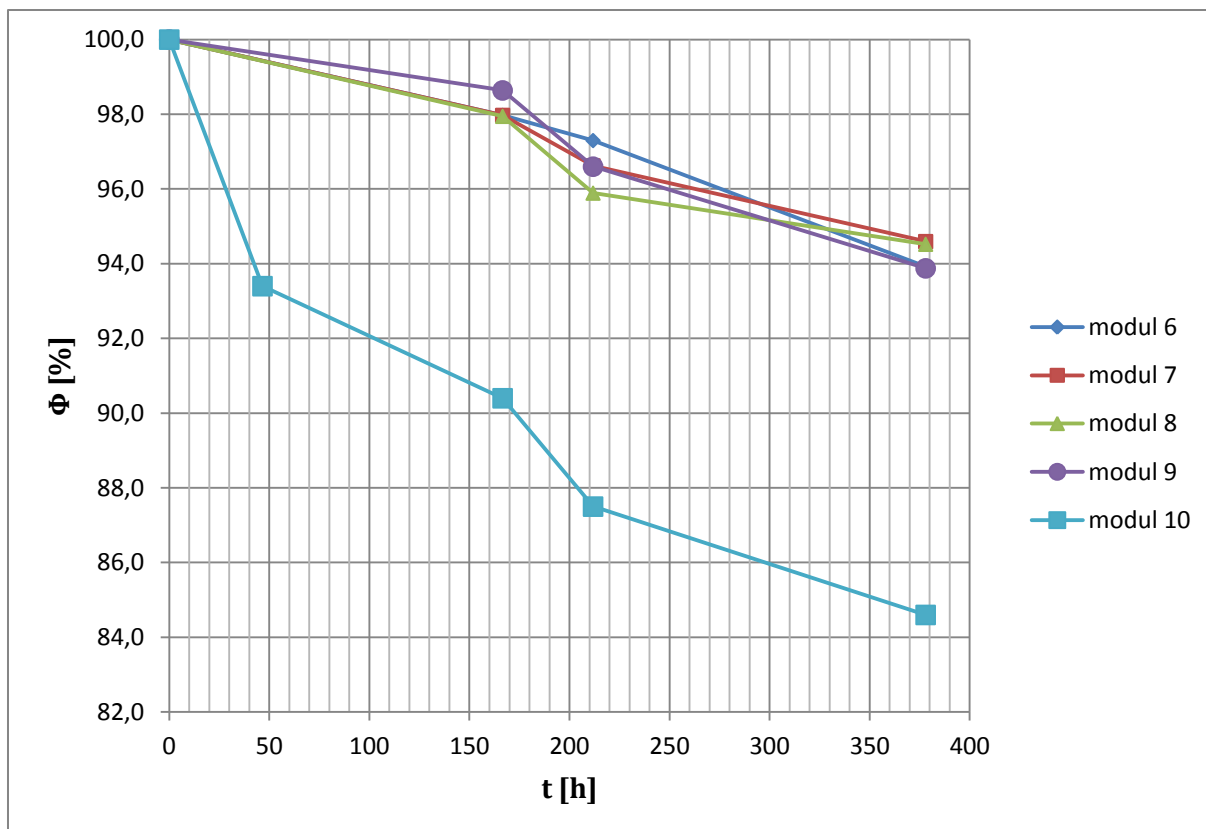
Obrázek 33. Vlevo detail pájeného kontaktu nedegradované LED, vpravo kontakt LED čipu po vystavení 120 °C

V okolí pájky jsou zřetelné praskliny a povrch je členitější než u kontaktu LED modulu, který nebyl vystaven této extrémní teplotě. Výrazné jsou také častější tmavé skvrny, které mohou být důsledkem rychlejší povrchové koroze.

3.2.2 Tepelné namáhání napájených LED při teplotě 120 °C

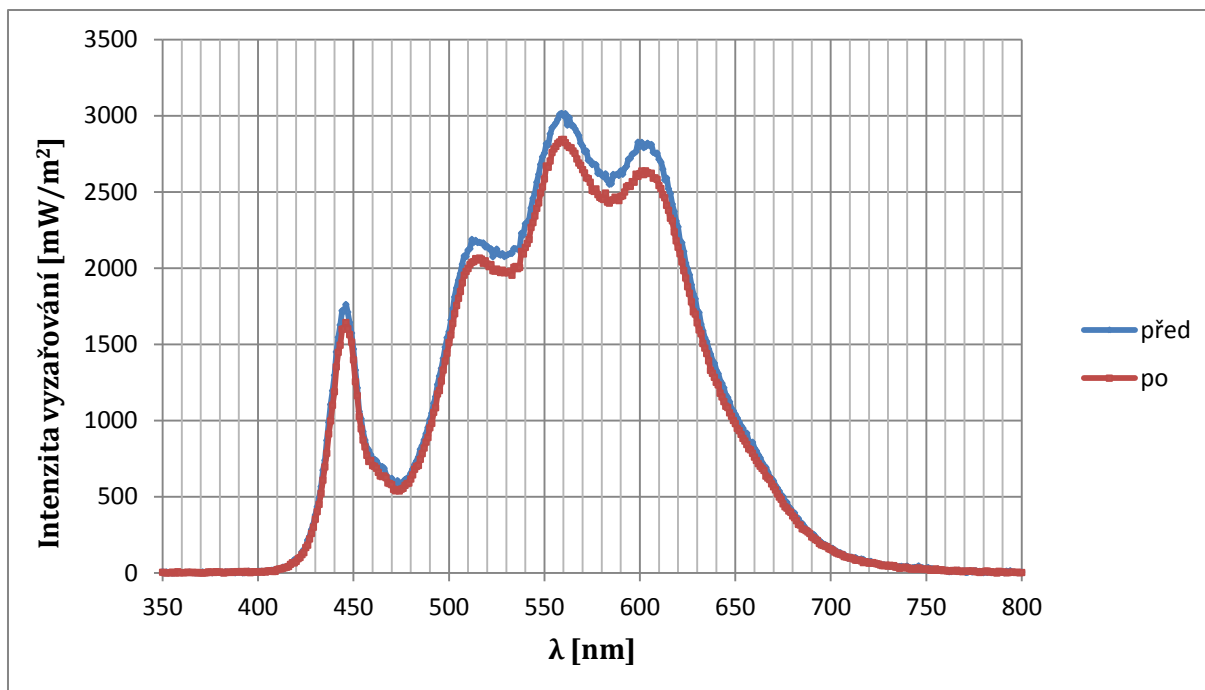
Tyto moduly pod číselným označením 6 až 10 byly v téže komoře při stejné teplotě 120 °C. Moduly 6 až 9 byly paralelně připojeny k napájecímu předřadníku a každým modulem tekla proud kolem 85 až 90 mA. Přesný proud nebylo možné zjistit, jelikož předřadník poskytoval konstantní proud 350 mA, proud, který by tekla jedním modulem, by byl dán jeho elektrickými parametry. Modul 10 byl samostatně připojen k předřadníku o konstantním proudu 300 mA a předpokládám, že díky tomuto dostatečně vysokému proudu se nebude modul schopen chladit a degradace proběhne rychleji než u ostatních čtyř modulů. Proto jsme s kolegou pomocí termočlánku měřili teplotu na dvou místech, na bodě označeném T_c k tomu určeném a na přívodním kontaktu jednoho LED čipu. Teplotu jsme měřili po celou dobu vystavení a v bodě T_c mírně kolísala kolem 127 °C, zatímco na přívodním kontaktu diody dosahovala přibližně 131 °C.

Všechny moduly byly vystaveny těmto podmínkám po dobu téměř 380 hodin. Světelný tok byl zaznamenán celkem čtyřikrát u modulů 6 až 9 a celkem pětkrát u modulu 10 (obr. 34).



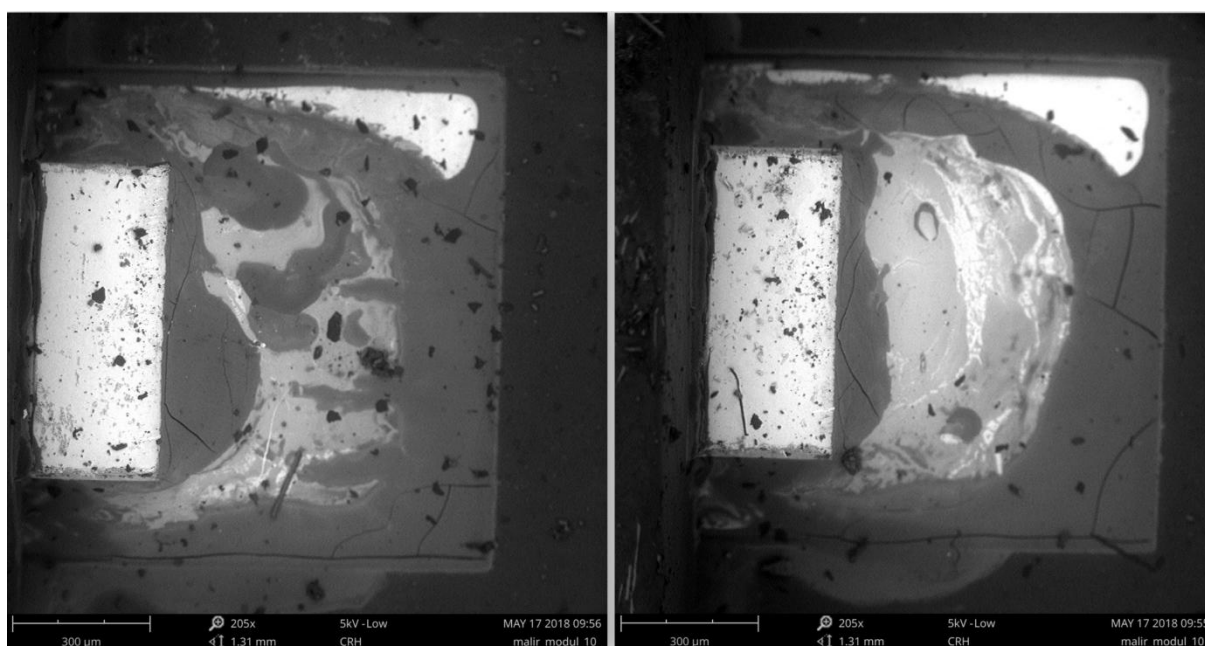
Obrázek 34. Napájené moduly v suchém teple 120 °C, moduly 6 až 9 s proudem kolem 70 mA, modul 10 s proudem přibližně 300 mA

Změny ve vyzařovaných spektrech se opět příliš neprojevily, pouze u modulu 10 (obr. 35) byl výraznější pokles intenzity vyzařování pro všechny vlnové délky v porovnání s ostatními vzorky, což nejspíše jen reprezentuje výraznější pokles světelného toku oproti ostatním modulům.



Obrázek 35. Změna ve vyzářovaném spektru modulu 10

Níže je zaznamenán detail dvou pájených kontaktů LED čipu z modulu 10, který byl napájen vyšším proudem (obr. 36).

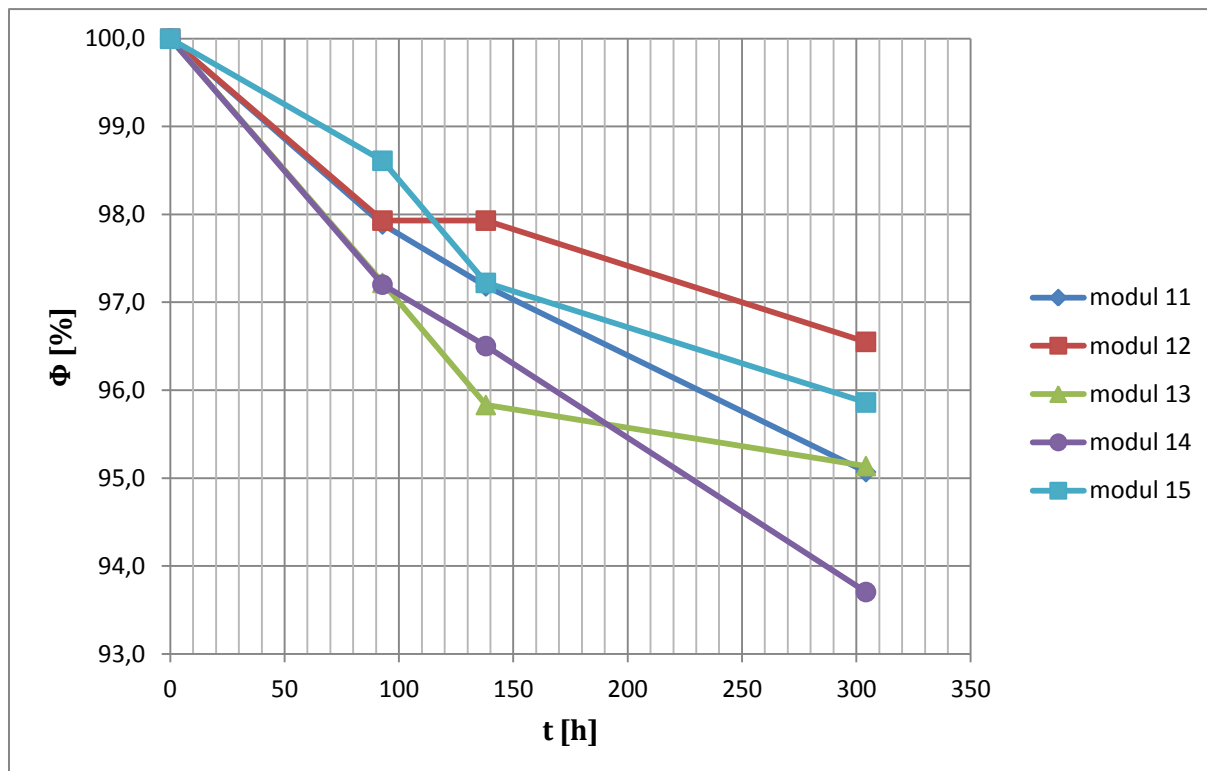


Obrázek 36. Dva různé pájené kontakty jednoho LED čipu z modulu 10, jež byl vystaven teplotě 120 °C a protékal jím proud 300 mA

Oproti nedegradovanému kontaktu je zde mnohem vyšší četnost skvrn, které nejspíš reprezentují korozi stříbra. Zvýšený počet prasklin bude mít podobný význam jako u předchozího případu bez napájení.

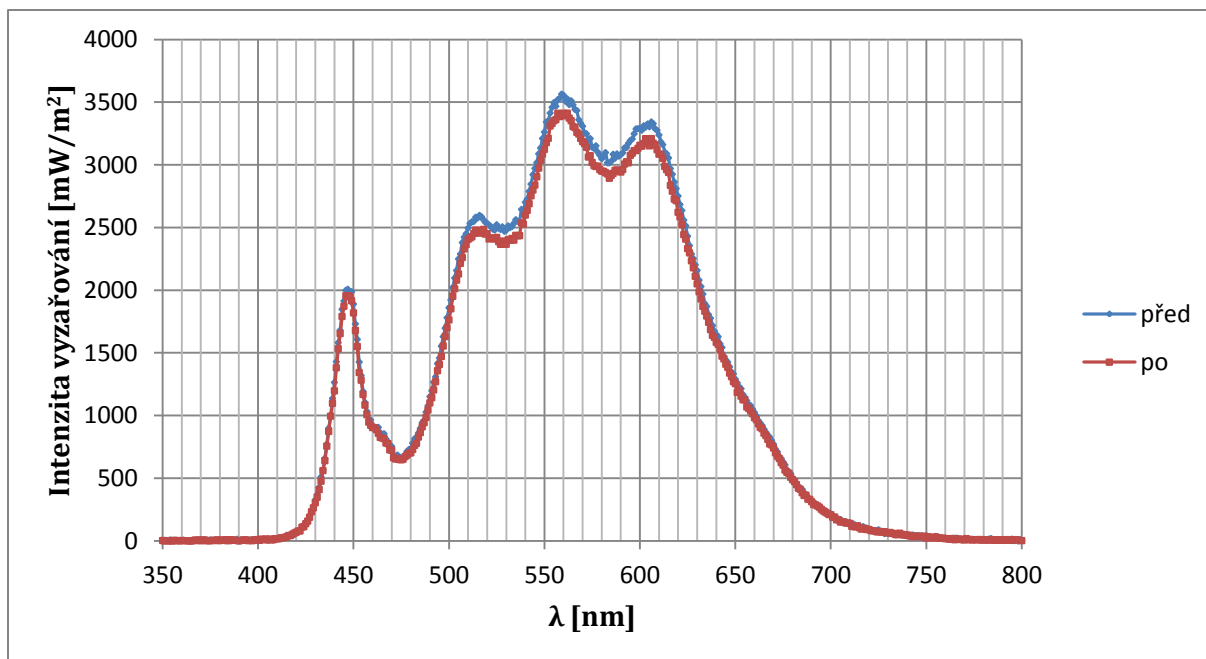
3.2.3 Tepelné namáhání při vysoké relativní vlhkosti

Pět modulů pod označením 11 až 15 byly tentokrát vystaveny teplotě 85 °C a relativní vzdušné vlhkosti 85 %. Moduly nebyly napájeny a v komoře byly volně položeny přibližně po dobu 300 hodin. Světelný tok se podařilo zaznamenat celkem čtyřikrát (obr. 37).



Obrázek 37. Pokles světelného toku u modulů 11 až 15 vystavených teplotě 85 °C a relativní vzdušné vlhkosti 85 %

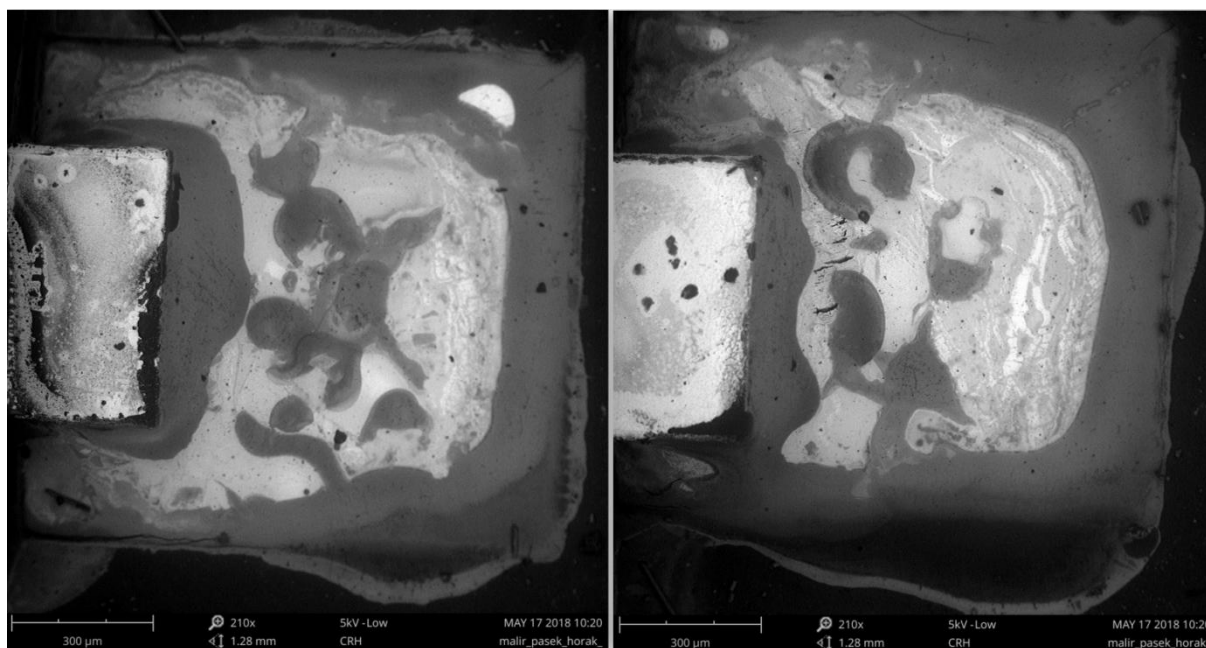
Spektrum se u těchto pěti modulů změnilo pouze méně patrným poklesem intenzity vyzařování. Pokles byl ale viditelný u všech pěti modulů, lze tedy uvažovat o některých degradačních procesech. Jako příklad je uvedeno spektrum modulu 15 (obr. 38).



Obrázek 38. Změna ve spektru modulu 15

Spektrum se takto posunulo téměř u všech modulů stejně. Protože opět nenastal žádný posun ve vodorovném směru, což by znamenalo změnu ve složení emitovaného spektra, je zřejmé, že změřený pokles intenzity vyzářování příslušející vlnovým délkám opět reprezentuje pokles světelného toku.

Níže na obrázku je uveden detail z elektronového mikroskopu (obr. 39). Zobrazeny jsou opět dva pájené kontakty LED čipu tentokrát modulu vystaveného tepelně-vlhkým účinkům.



Obrázek 39. Dva různé pájené kontakty jednoho LED čipu modulu po degradaci při teplotě 85 °C a relativní vlhkosti 85 %

Na obou kontaktech je zřetelná koroze především v oblastech hran a rohů patek kontaktů LED. Patrné jsou též četné skvrny a drobné praskliny. Je zřejmé, že zvýšená vlhkost výrazněji podpořila korozi povrchu, než u působení suchého tepla.

3.2.4 Experimenty s oxidem siřičitým

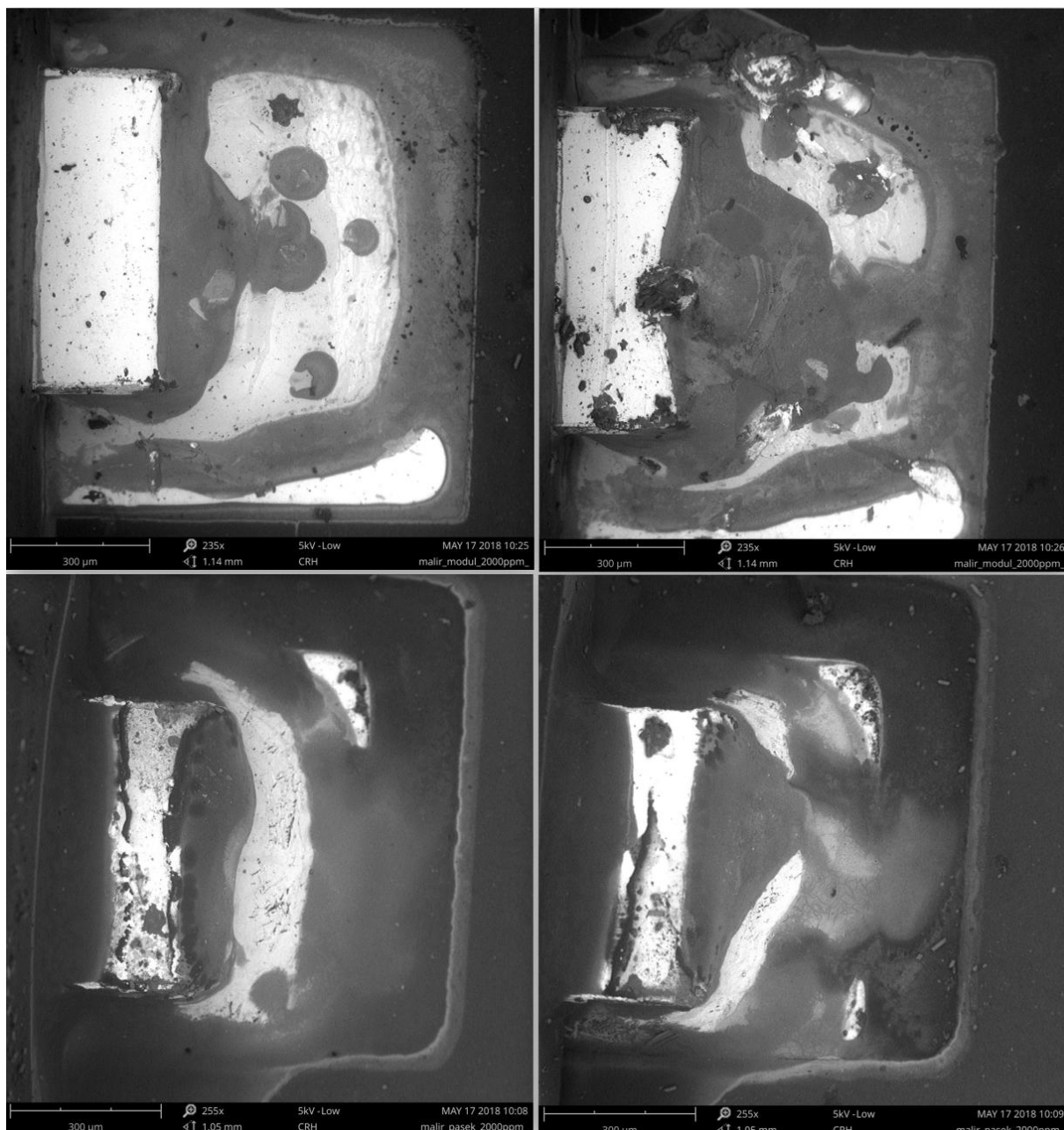
Redukované moduly společně s LED pásky byly ve skleněných válcích vystaveny působení oxidu siřičitého přibližně 161 hodin. Po vyjmutí z válců jsem přeměřil světelný tok, spektrum a voltampérové charakteristiky částí modulů. Jednalo se o pásky pod číselným označením 2, 3, 5, 6, 8 a 10 a redukované moduly 2, 3, 4, 5. Poté jsem vložil tyto moduly společně s pásky do komory s vlhkostí 85 % a teplotou 85 °C. V této komoře zůstaly LED zdroje ležet dalších 68 hodin. Poté jsem pouze změřil světelný tok a proměřil Voltampérové charakteristiky.

Měření spekter a voltampérových charakteristik neodhalily žádné změny. V měření světelného toku jsem zaznamenal téměř nepatrný pokles. Jelikož bylo LED zdrojů více a na každý zdroj pouze tři relativní hodnoty světelného toku, uvádím raději přehlednější tabulku (tab. 1). Sloupec s hodnotami označený jako A) obsahuje procentuální vyjádření světelného toku před vložením do komory s vysokou teplotou a vlhkostí, sloupec s označením B) po vytažení z komory.

Tabulka 1. Záznam poklesu světelného toku

161,3 h v SO ₂	konc. SO ₂ [ppm]	Φ [%] před degradací	Φ [%] po degradaci A)	Φ [%] po degradaci B)
modul 3	100	100,0	99,8	99,3
pásek 3			100,1	99,2
modul 5	500	100,0	99,3	100,0
pásek 8			99,7	100,0
modul 2	1000	100,0	99,8	99,8
pásek 6			100,0	100,0
pásek 10			99,6	99,1
modul 4	2000	100,0	99,9	99,0
pásek 2			99,8	99,2
pásek 5			100,0	99,3

Dále je uveden detail čtyř pájených kontaktů (obr. 40). V horní části obrázku jsou zobrazeny dva pájené kontakty jednoho LED čipu z redukovaného modulu, níže jsou pak zobrazeny dva kontakty jednoho LED čipu z LED pásky. Oba tyto LED zdroje byly ve válci s teoretickou koncentrací 2000 ppm SO₂.



Obrázek 40. Nahoře jsou dva kontakty LED modulu, dole dva kontakty LED z pásku

Na všech snímcích se nacházejí rozsáhlé tmavé skvrny, jež jsou opět nejspíše důsledkem koroze stříbra. Navíc v případě kontaktů LED z pásku a kontaktu z modulu (nahore vpravo) jsou viditelné i výrazné praskliny. Je možné, že zde došlo i k reakci zbytkového množství sirných složek se stříbrem a zvýšená vlhkost a teplota tuto reakci urychlily.

4. Závěr

U pětice modulů vystavených působení teploty 120 °C za sucha po dobu přes 700 hodin je rozhodující pokles světelného toku. I přes kolísání naměřených hodnot světelného toku je patrný pokles světelného toku způsobený stárnutím LED. Bohužel z důvodu nedostačených časových prostředků, kdy by bylo možné experimenty protáhnout řádově alespoň na tisíc a více hodin, nelze určit, jaký má pokles matematický charakter vzhledem k času. V některých případech (modul 1, modul 2) došlo k naměření stejné hodnoty světelného toku nebo i mírně větší, než při hodnotě předchozí. To může být způsobeno buď chybou měření, nebo to lze vysvětlit nedokonalostí připájení kontaktů LED na modulu. Při takto zvýšené teplotě mohlo dojít k dokonalejšímu prohřátí a tím i připájení a celkový odpor mohl tak mírně klesnout.

Spektrum u těchto pěti modulů vykazuje pouze velmi mírný pokles intenzity vyzařování a k žádnému významnému posunu v rámci vlnových délek nedošlo. Voltampérové charakteristiky neodhalily žádnou významnou změnu elektrických parametrů LED na těchto modulech. Ze snímků jsou však patrné převažující praskliny a na povrchu se začínají objevovat menší náznaky poruch či koroze. Přes velmi malou průkaznost těchto ostatních zkoumaných parametrů je světelný tok rozhodujícím faktorem. V případě takto vysokých teplot tedy dochází k urychlené degradaci LED.

V případě modulů napájených ze zdroje konstantního proudu je opět viditelný pokles světelného toku, který absolutně rozhoduje o míře degradace. U čtyř modulů, kde každý LED modul byl napájen proudem 85 mA, došlo během 380 hodin k mírnému poklesu světelného toku na úroveň 94 % vůči výchozímu měření. Světelný tok LED modulu, který byl napájen ze zdroje konstantního proudu 300 mA, to je cca 3,5 větší proud, než u výše popsaného experimentu, poklesl o 15 % oproti výchozímu měření. I přes velmi málo zaznamenaných hodnot toku je zde patrný neustálý pokles a silná závislost na protékajícím proudu. Při měření teploty na LED modulu napájeném proudem 300 mA bylo zjištěno, že na bodě T_c určeném k měření teploty bylo kolem 127 +/- 1 °C a na přívodním kontaktu jedné LED kolem 131 +/- 1 °C. Z experimentu je patrné, že se vzrůstající teplotou dochází k rychlejšímu stárnutí LED modulu. Měření spekter neodhalilo žádný posun ve směru vlnových délek, nedošlo tedy ke znečištění luminoforu nebo pouzdřicí čočky.

Detail z elektronového mikroskopu zviditelnil mnohem vyšší četnost skvrn a prasklin na kontaktech, než bylo u nenapájených modulů vystavených této teplotě. V polovičním čase, než byl u nenapájených modulů, je povrch pokryt velkým množstvím malých černých teček reprezentujících nejspíše korozi a objevují se i malé praskliny v nanosené pájce. Celkově lze tedy usoudit, že protékající proud má zásadní vliv na degradaci LED při zvýšené okolní teplotě a tuto degradaci urychluje. Dále záleží na velikosti protékajícího proudu, větší proud v tomto případě pokles světelného toku a tím i degradaci ještě urychlil.

V případě modulů vystavených teplotě 85 °C a při relativní vlhkosti 85 % po dobu přibližně 300 hodin pokles světelného toku opět dosvědčuje postupnou degradaci. Měření spekter ani voltampérových charakteristik neprokázaly žádné významné změny ať ve struktuře LED čipu, nebo na přívodních kontaktech. Je možné, že měření těchto parametrů má smysl u vzorků po delší expozici.

Na detailu pájených kontaktů LED čipu je několik tmavých skvrn a hrany vlastního kontaktu čipu jsou zřejmě silně napadeny korozi. Je tudíž očividné, že došlo k počátku výraznějšího poškození kontaktů a lze očekávat, že při delší době vystavení modulů těmto podmínkám, by došlo k postupnému rozkládání kontaktů. Závěrem lze tedy konstatovat, že zvýšená vlhkost degradaci LED urychluje.

Moduly vystavené korozní atmosféře SO_2 ve válcích při různých koncentracích nevykazují žádný pokles světelného toku ani před dodatečně působící vlhkostí, ani po ní. Ve válcích pod vlivem oxidu siřičitého setrvaly moduly přibližně 160 hodin a v komoře simulující teplé a vlhké prostředí kolem 70 hodin. Přesto se neprojeví žádné změny ve spektrech, světelném toku, ani ve voltampérových charakteristikách. Na snímcích kontaktů LED z pásky a modulu jsou ale pozorovatelné rozsáhlé tmavé skvrny a větší praskliny vzniklé nejspíš reakcí síry se stříbrem. Nelze tedy vyloučit, že došlo k počínající agresivní korozi síry, kterou vlhkost silně podpořila.

Z předešlých experimentů s oxidem siřičitým provedených v komoře Liebisch, kdy LED moduly byly vystaveny za sucha nedefinované koncentraci SO_2 a některé pak ještě vlhku, došlo v obou případech k pokročilému stádiu degradace. V obou případech došlo na modulech a páscích u mnohých LED k nárůstu sériového odporu (viz. obr. 20), což dokazují jednak snímky pořízené optickým a elektronovým mikroskopem, jednak změřené voltampérové charakteristiky, kde na některých LED je úbytek napětí až čtyřnásobný v porovnání s nepoškozenou LED (viz. obr. 21). Z toho lze s jistotou usoudit, že sloučeniny síry jsou v případě LED světelných zdrojů velmi agresivními faktory snižující životnost. Proč nedošlo k výraznějším změnám u modulů a pásek vložených do válců může být vysvětleno několika způsoby. Nejpravděpodobněji byly moduly s pásky takto vystaveny po nedostatečně dlouhou dobu, a degradace tak nestačila postoupit do znatelnějšího stádia. Dalším možným důvodem může být dokonalejší těsnost pouzder a provedení kontaktů, využití odolnějších materiálů. Poslední možností je, že oxid ve válcích nevydržel v původních koncentracích, postupem času z válců unikal a vzorky tak nebyly vystaveny náročnějším podmínkám. Při otevírání válců se ovšem ukázalo, že oxid ještě přítomen byl, avšak jestli byla koncentrace stejná, je diskutabilní.

Z provedených experimentů a reprezentovaných výsledků plyne, že jednotlivá provozní prostředí mohou degradaci LED urychlovat různým způsobem. Ač byl nedostatek časové rezervy, u všech vybraných typů prostředí došlo alespoň k náznakům urychlení degradace LED a u některých i pokročilejším stavům stárnutí. LED světelné zdroje jsou perspektivním řešením pro mnohé světelné aplikace, avšak jejich použití může být výrazně omezeno vlivy těchto provozních prostředí.

Použitá literatura

- [1] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK a Marek BÁLSKÝ. *Světelná technika*. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [2] DVORÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje - světelné diody. *SVĚTLO*. 2009, **2009**(05), 4.
- [3] HABEL, Jiří a Petr ŽÁK. Terminologie LED světelných zdrojů. *SVĚTLO*. 2017, **2017**(3), 4.
- [4] PAVELKA, Tomáš, Jan ŠKODA a Petr BAXANT. Historie světelných diod. *SVĚTLO*. 2016, **2016**(2), 3.
- [5] Polovodiče. *Elektrina a magnetismus* [online]. Vsetín: SPŠS [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <http://www.spssvsetin.cz/assets/05/el-10.htm>
- [6] Comparison of SMD and DIP LEDs for use in Large Format LED screens. *LED Sign & Display Specialists* [online]. Velká Británie: Messagemaker blog, 2014 [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <http://blog.messagemaker.co.uk/comparison-of-smd-and-dip-leds-for-use-in-large-format-led-screens/>
- [7] RETRAST TRADE. Historie, současnost a technické pojmy LED zdrojů světla. *Manuál LED parametrů*. 2012, **2012**, 12.
- [8] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Fyzikální podstata přechodu PN. *Encyklopedie fyziky* [online]. MEF, 2012 [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/265-fyzikalni-podstata-prechodu-pn>
- [9] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *ELEKTRONIKA součástky a obvody, principy a příklady*. Druhé rozšířené. Praha: Grada, 2001. ISBN 80-7169-884-9.
- [10] Výhody a nevýhody LED žárovek. *LEDme* [online]. ČR: LEDme, 2015 [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: https://ledme.cz/textove-novinky/2_vyhody-a-nevyhody-led-zarovek.html
- [11] DOLEŽAL, Petr. *Příčiny poruch a selhání LED při provozu*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [12] VALENTA, Jan. Modrá je dobrá. Díl 1. Stoletá cesta svítivých diod od kuriozity k Nobelově ceně. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*. JČMF, 2015, **60**(1), 17.
- [13] Discoloration. *Case study of LED PKG*. SAMSUNG ELECTRONICS, LED Division, Semiconductor Business, 2015, **2015-12-10**(1.0), 37.
- [14] SCHUBERT, E. Fred. *Light-Emitting Diodes*. 1. Cambridge: University Press, 2003. ISBN 0 521 53351 1.
- [15] *Glamox* [online]. Glamox, 2012 [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: <http://glamox.com/gsx/led-lifetime-and-the-factors-that-affect-it>
- [16] *OSRAM* [online]. OSRAM, 2014 [cit. 2018-02-25]. Dostupné z: http://www.osram-os.com/osram_os/en/news--events/spotlights/technology/2014/how-long-do-leds-last/index.jsp

- [17] FOLKERT, D. *Light-Emitting Diode Junction-Temperature Sensing using Various Voltage/Current Measurement Techniques*. Delft, 2011. MSc Thesis. Delft University of Technology.
- [18] ZABILIUTE, Akvilie. *Temperature characteristics of LEDs*. Vilnius, 2013.
- [19] *IES LM-80-08 TEST REPORT*. Bucheon-city, 2014.
- [20] PAVELKA, Tomáš. *Provozní vlastnosti LED a jejich modelování*. Brno, 2016. Disertační práce. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [21] Failure and degradation mechanisms of high-power white light emitting diodes. *Microelectronics reliability* [online]. 2010, **2010**(50), 6 [cit. 2018-03-17]. ISSN 0026-2714. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271410001241>
- [22] Degradation Physics of High Power LEDs in Outdoor Environment and the Role of Phosphor in the degradation process. *PubMed Central*[online]. US National Library of Medicine, 2016 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4823744/>
- [23] LED Color Characteristics. In: *U. S. Department of Energy* [online]. Energy Efficiency & Renewable Energy, 2016 [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/04/f30/led-color-characteristics-factsheet.pdf>
- [24] *LED Luminaire Reliability: Impact of Color Shift*. U. S., 2017.
- [25] *Chemical Guide for LED Components*. South Korea, 2014.
- [26] LED and Lens Degradation Through Volatile Organic Compounds. *LED professional* [online]. 2016 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/led-and-lens-degradation-through-volatile-organic-compounds-by-cree>
- [27] *Solid State Lighting Reliability Part 2*. 1. Switzerland: Springer, 2018. ISBN 978-3-31958174-3.
- [28] *The Influence of SO2 Environments on Immersion Silver Finished PCBs by Mixed Flow Gas Testing*. Beijing, 2009.
- [29] ITECH Solution of LED Driver Test. *ITECH* [online]. ITECH, 2015 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <http://www.itechate.com/en/about/detail2-142.htm>
- [30] *Case Study Discoloration*. SAMSUNG ELECTRONICS, 2015.
- [31] *Application Note*. Rev 0.0. South Korea: SAMSUNG ELECTRONICS, 2014.
- [32] Oxid siřičitý. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_si%C5%99i%C4%8Dit%C3%BD

[33] *Zkoušky s oxidem siřičitým*. ČVUT PRAHA, 2018.

Seznam obrázků

Obrázek 1. Viditelné spektrum světla [1].....	16
Obrázek 2. Rozložení teploty chromatičnosti [1]	18
Obrázek 3. Schéma krystalové mřížky křemíku, polovodiče svlastní vodivosti [5].....	19
Obrázek 4. Atom india dodávající do celkového počtu nosičů náboje díru navíc [5]	20
Obrázek 5. Atom arzenu v monokrystalu křemíku s elektronem navíc [5].....	21
Obrázek 6. Rekombinace elektronů (na obrázku modře) s dírami (na obrázku červeně) [9].....	22
Obrázek 7. Konstrukční provedení typu DIP [6].....	23
Obrázek 8. Voltampérová charakteristika LED diody v propustném směru [29].....	24
Obrázek 9. Závislost relativní intenzity vyzařování na vlnové délce bílých LED pro tři možné teploty chromatičnosti [1].....	25
Obrázek 10. Schematické uspořádání dvojité heterostrukury [14].....	26
Obrázek 11. Zobrazení průběhů intenzity vyzařování planární struktury dvou LED a dvou tzv. Mesa-etched LED, kde je využito leptání k dosažení výsledné struktury. Na povrchu aktivní zóny může docházet k rekombinaci častěji, než u planární LED. [14].....	27
Obrázek 12. Uspořádání vrstev LED [14].....	28
Obrázek 13. SMD provedení LED součástky [7].....	29
Obrázek 14. Provedení COB [7].....	29
Obrázek 15. Životnost výkonných LED čipů v závislosti na teplotě P-N přechodu pro různé velikosti napájecích proudů [17]	33
Obrázek 16. Pokles světelného toku 25 LED čipů při teplotě kolem 55 °C a protékajícím proudem 1 A na vzduchu při relativní vlhkosti 11,3 % [19].....	34
Obrázek 17. Závislost posunu chromatičnosti 25 vzorků LED čipů při teplotě kolem 55 °C s protékajícím proudem 1 A na vzduchu při relativní vlhkosti 11,3 % [19].....	35
Obrázek 18. Vlevo je LED čip v normálním stavu, vpravo byl čip vystaven působení VOC při vysokém světelném výkonu při jmenovitých teplotách prostředí [26].....	36
Obrázek 19. Vlevo je LED po sulfurizaci a je vidět patrné tmavší zbarvení kolem LED čipu, vpravo je LED v normálním stavu [30].....	37
Obrázek 20. Změna ve voltampérových charakteristikách diod na LED modulu [33]	40
Obrázek 21. Změna ve Voltampérových charakteristikách diod na LED pásku [33]	40
Obrázek 22. Horní dva obrázky reprezentují poškození pouzdra, prostřední dva přívodní kontakty a dole je zobrazen detail substrátu a LED čipu [33]	41
Obrázek 23. Detail původního pájeného kontaktu, vlevo z LED pásku, který byl po vystavení oxidu siřičitému ještě vystaven tepelně-vlhkým podmínkám, vpravo kontakt LED modulu vystaveného pouze oxidu siřičitému	42
Obrázek 24. Používaný modul Vyrtych 280x66 mm, U_{max} 34 V, I_{max} 500 mA, t_{cmax} 80 °C.....	42
Obrázek 25. Upravený modul pro skleněný válec.....	43
Obrázek 26. LED pásek, U_{max} 23 V, I_{max} 650 mA, t_{cmax} 85 °C pro použití do válců	43
Obrázek 27. Měření teploty termočlánkem na přívodním kontaktu LED a v bodě T_c na modulu 10	44
Obrázek 28. Sestavená aparatura sloužící k přesnějšímu dávkování oxidu siřičitého	46
Obrázek 29. Utěsněné válce s oxidem siřičitým koncentrací 100 ppm, 500 ppm, 1000 ppm, 2000 ppm.....	47
Obrázek 30. Přípravek sloužící k měření Voltampérových charakteristik	49

Obrázek 31. Závislost poklesu světelného toku na čase zhasnutých vzorků vystavených teplotě 120 °C	50
Obrázek 32. Změna ve spektru modulu 5, modrá barva reprezentuje spektrum před degradací, červená po degradaci.....	50
Obrázek 33. Vlevo detail pájeného kontaktu nedegradované LED, vpravo kontakt LED čipu po vystavení 120 °C.....	51
Obrázek 34. Napájené moduly v suchém teple 120 °C, moduly 6 až 9 s proudem kolem 70 mA, modul 10 s proudem přibližně 300 mA.....	52
Obrázek 35. Změna ve vyzařovaném spektru modulu 10.....	53
Obrázek 36. Dva různé pájené kontakty jednoho LED čipu z modulu 10, jež byl vystaven teplotě 120 °C a protékal jím proud 300 mA.....	53
Obrázek 37. Pokles světelného toku u modulů 11 až 15 vystavených teplotě 80 °C a relativní vzdušné vlhkosti 85 %.....	54
Obrázek 38. Změna ve spektru modulu 15.....	55
Obrázek 39. Dva různé pájené kontakty jednoho LED čipu modulu po degradaci při teplotě 85 °C a relativní vlhkosti 85 %.....	55
Obrázek 40. Nahoře jsou dva kontakty LED modulu, dole dva kontakty LED z pásku	57