

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE



**SLEDOVÁNÍ A DIAGNOSTIKA PARAMETRŮ
LED**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

LEDEN 2024

TIROL MAREK

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tirol** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **498891**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Sledování a diagnostika parametrů LED

Název bakalářské práce anglicky:

Monitoring and diagnostics of LED parameters

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií a strukturou LED zpracováním rešerše a prostřednictvím přípravy výbrusů.
- 2) Připravte si vzorky LED pro sledování jejich vlastností (včetně výbrusů), které mezi sebou porovnáte.
- 3) Navrhněte metodiku testování parametrů LED.
- 4) Výsledky analýz vyhodnotte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [2] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2*
- [3] Feng, Zhe Chuan, ed. Handbook of Solid-State Lighting and LEDs. CRC press, 2017, ISBN: 978-1-4987-4141-5

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Martin Plaček, Ph.D. katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **19.09.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **16.02.2025**

Ing. Martin Plaček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis otkara(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

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.

V Praze dne

.....

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval svému vedoucímu práce, Ing. Martinu Plačkovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady a pomoc při zpracování této práce. Děkuji také firmě Vyrtych a.s. za poskytnutí měřicích pracovišť a za pomoc s měřením vzorků pro vypracování praktické části této práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Denisovi Frošovi za cenné rady a podněty pro zpracování této práce.

V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za jejich podporu a pochopení během celého zpracování této práce.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá pozorováním a vlivem degradace na různě kryté LED moduly. Výsledky praktické části poukázaly na vliv krytí LED modulů při degradaci, a tím na změny jejich vlastností. Degradace způsobuje významné zhoršení spektrálních charakteristik a celkového zářivého toku LED modulů. Výsledky by mohly být využity při návrhu krytí osvětlení pro dané aplikace.

Klíčová slova: LED, degradace, vyzařované spektrum, V-A charakteristika LED, metalografické výbrusy, intermetalická vrstva, IMC

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the observation and effect of degradation on variously covered LED modules. The results of the practical part have shown the effect of the LED modules' coverage during degradation and thus the changes in their properties. It causes significant degradation in the spectral characteristics and overall radiant flux of the LED modules. The results could be used in the design of lighting coverages for given applications.

Keywords: LED, degradation, emitted spectrum, V-A characteristic of LED, metallographic etching, intermetallic layer, IMC

OBSAH

ÚVOD	1
KAPITOLA 1: SVĚTLO	2
1.1 LED (LIGHT-EMITTING DIODE)	2
1.2 POLOVODIČE S VLASTNÍ VODIVOSTÍ	2
1.3 POLOVODIČE S NEVLASTNÍ VODIVOSTÍ TYPU N	3
1.4 POLOVODIČE S NEVLASTNÍ VODIVOSTÍ TYPU P	3
1.5 P-N PŘECHOD	4
1.6 PRINCIP FUNKCE	4
1.7 TYPY LED	5
1.7.1 DIP LED (Dual In-line Package LED).....	5
1.7.2 SMD LED (Surface Mount Device LED)	6
1.7.3 COB LED (Chip On Board LED).....	6
1.8 KONCEPCE LED SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	7
1.8.1 LED čip.....	7
1.8.2 LED součástka	7
1.8.3 LED modul.....	7
1.9 V-A CHARAKTERISTIKA	8
1.9.1 Vliv sériového odporu na V-A charakteristiku	9
1.10 SVĚTELNĚ TECHNICKÉ VELIČINY	10
1.10.1 Spektrometrické veličiny	10
1.10.2 Fotometrické veličiny.....	10
1.11 DEGRADACE LED	11
1.11.1 Intermetalická vrstva IML (Intermetallic layer)	12
1.11.2 Wirebonding.....	13
KAPITOLA 2: METALOGRAFIE	14
2.1 ODBĚR VZORKU	14
2.2 PREPARACE VZORKU	14
2.2.1 Preparace za studena	14
2.2.2 Preparace za tepla	15
2.3 BROUŠENÍ	15
2.3.1 Druh povrchu brusného kotouče a velikost a tvar částic brusiva.....	15
2.3.2 Postupné snižování zrnitosti	15
2.3.3 Velikost přitlačné síly a rychlost otáčení kotouče	15

2.3.4	Použité smáčedlo, chladicí médium a Beilbyho vrstva	16
2.3.5	Ruční broušení.....	16
2.3.6	Poloautomatické broušení.....	16
2.4	LEŠTĚNÍ.....	16
KAPITOLA 3: PRAKTICKÁ ČÁST.....		17
3.1	PŘEDSTAVENÍ.....	17
3.2	POUŽITÉ LED.....	17
3.3	KLIMATICKÉ ZKOUŠKY (PROCES DEGRADACE)	18
3.4	PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO MĚŘENÍ SVĚTELNĚ TECHNICKÝCH VELIČIN A V-A CHARAKTERISTIKY.....	20
3.5	VYHODNOCENÍ PROVEDENÝCH ZKOUŠEK.....	20
3.5.1	Měření fotometrických veličin	20
3.5.2	Měření V-A charakteristiky	22
3.6	PŘÍPRAVA VÝBRUSU A MIKROSKOPICKÉ SNÍMKY	23
3.7	VÝSLEDKY IMC VRSTVY.....	27
ZÁVĚR		29
LITERATURA		30

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Spektrum elektromagnetického záření [1](upraveno)	2
Obr. 2 Vnitřní struktura polovodiče s nevlastní vodivostí typu N [3] a jeho pásový model [2].....	3
Obr. 3 Vnitřní struktura polovodiče s nevlastní vodivostí typu P [3] a jeho pásový model [2]	4
Obr. 4 Rekombinace v P-N přechodu (v propustném směru diody [4] (upraveno).....	4
Obr. 5 Základní konstrukce DIP LED [5].....	5
Obr. 6 Řez SMD LED [6].....	6
Obr. 7 Tvorba "bílé" LED, vlevo phosphor converted LED[5], vpravo RGB LED [9]	7
Obr. 8 V-A charakteristika diody.....	8
Obr. 9 Změna V-A charakteristiky vlivem zvýšení sériového odporu po různě dlouhém zatížení [23].....	9
Obr. 10 Schématické znázornění intermetalické vrstvy	12
Obr. 11 Schéma vytvoření elektrického kontaktu technologií termosonického wirebondingu [25]	13
Obr. 12 Porovnání růstu IMC vrstev u wire-bonding materiálů (Au, Ag, Cu) [17].....	13
Obr. 13 Schéma přípravy metalografického výbrusu [20]	14
Obr. 14 Preparace za studena (vlevo) preparace za tepla (vpravo) [20].....	15
Obr. 15 Příklad poloautomatické brusky [22].....	16
Obr. 16 Měřené vzorky a jejich štítkové hodnoty (vlevo pro krátký LED modul a vpravo pro delší LED modul.....	17
Obr. 17 Teplotní profil jednoho cyklu pro jednotlivé vzorky.....	19
Obr. 18 Vložení vzorků do klimatické komory.....	19
Obr. 19 Příprava vzorků na experimentální část	20
Obr. 20 Graf vyzařovaných spekter zkoumaných LED	21
Obr. 21 Přípravek pro měření V-A charakteristiky.....	22
Obr. 22 Zprůměrované výsledné V-A charakteristiky zkoumaných LED.....	23
Obr. 23 Část vzorků připravených pro pozorování mikroskopem	24
Obr. 24 Převod mikroskopického snímku do binární podoby	25
Obr. 25 Mikroskopický snímek řezu LED	25
Obr. 26 Detailní mikroskopický snímek anody LED s bondovaným spojem a IMC vrstvou.....	26
Obr. 27 Detailní snímek intermetalické vrstvy	26
Obr. 28 Detailní snímek bondovaného spoje	27
Obr. 29 Graf průměrných tloušťek IMC vrstvy	28

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vybrané štítkové hodnoty LED	18
Tab. 2 Tabulka významných hodnot z naměřených dat vyzařovaných spekter	21
Tab. 3 Tabulka s průměrnými hodnotami IMC vrstvy	27

ÚVOD

Moderní doba nás obklopuje stále se rozvíjejícími technologiemi, z nichž jednou z nejvýznamnějších je technologie LED (Light Emitting Diode). Jde o polovodičové součástky, jež mají široké uplatnění v oblasti elektroniky, osvětlení a displejů. Tato technologie se stává stále důležitější v našem každodenním životě díky svým výhodám, jako je energetická účinnost, vysoká životnost a široké spektrum možných aplikací. Motivací této práce je prostudovat a analyzovat technologii LED v klimatických podmínkách, které odpovídají možným budoucím různorodým aplikacím, a tím optimalizovat konstrukci svítidel pro danou aplikaci a prostředí.

Cílem této bakalářské práce je podrobné seznámení se s technologií a strukturou LED, prostřednictvím zpracování rešerše a přípravy vzorků LED, které budou následně podrobeny různým testům a analýzám. Práce byla realizována ve spolupráci s firmou Vyrtych a.s., která nám poskytla nejen vzorky LED, ale také možnost využít jejich měřicí pracoviště.

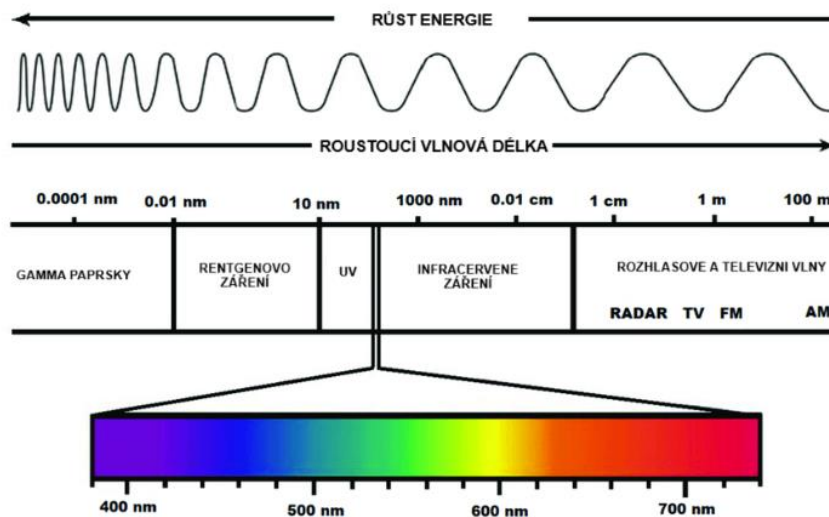
Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. V první části je provedena rešerše technologií a struktur LED a dále se zabývá technologií metalografických výbrusů. V druhé části bude realizována praktická část, která bude zaměřena na přípravu vzorků, různé testy a měření parametrů různě degradovaných LED modulů firmy Vyrtych a.s. To zahrnuje analýzu světelného výkonu, spektrální charakteristiky, V-A charakteristiky a vnitřní degradaci LED čipů/kontaktů.

Výsledky z testů a analýz budou poté vyhodnoceny a bude navržena metodika testování parametrů LED. Tyto výsledky nám pomohou lépe porozumět vlastnostem LED v různých podmínkách.

Doufám, že získané poznatky budou přínosem nejen pro akademickou sféru, ale i pro průmyslové a výzkumné oblasti, kde je technologie LED klíčovým prvkem.

KAPITOLA 1: SVĚTLO

V oblasti elektromagnetického záření, lze definovat libovolné záření vlnovou délkou či kmitočtem, jako například ultrafialové (UV) a infračervené záření. Mezi nimi se nachází na vlnových délkách 380 – 770 nm záření viditelné lidským okem. Světlo je jedním z nejdůležitějších vjemů v našem každodenním životě, které bylo dříve získáváno pouze ze slunce a ohně, ale po příchodu elektřiny vznikaly nové zdroje světla. Nejpoužívanějším zdrojem moderní doby je LED, která využívá k produkci světelného záření fyzikální vlastnosti PN přechodu.



Obr. 1 Spektrum elektromagnetického záření [1](upraveno)

1.1 LED (Light-Emitting Diode)

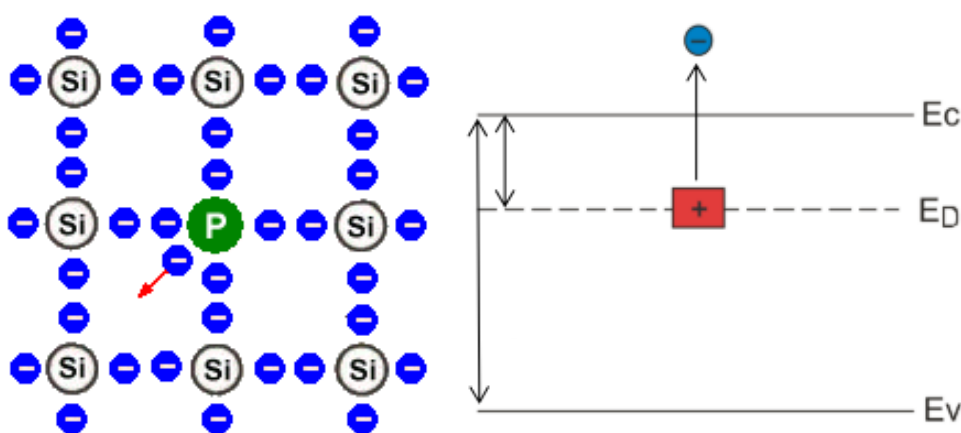
Jedná se o základní elektrotechnickou součástku, která emituje světlo v moderních svítidlech, displejích a jiných elektronických zařízeních. První praktické LED začaly na přelomu tohoto tisíciletí, kdy díky převaze výhod nad nevýhodami získaly LED velkou pozornost, a tím se velmi posunul jejich výzkum a vývoj.

1.2 Polovodiče s vlastní vodivostí

Polovodiče mají schopnost elektrické vodivosti díky volným nositelům náboje. V případě polovodičů s vlastní vodivostí jsou to elektrony a díry vytvořené termální aktivací. Při nulové teplotě jsou elektrony vázané a nepřispívají k vedení proudu, fungují jako izolanty. Avšak za určitých podmínek, jako je zvýšení teploty nebo působení jiných vnějších vlivů, může elektron překonat energetickou bariéru zakázaného pásma, čímž vytvoří díru ve valenčním pásmu. Elektron, který opustil valenční pásmo, zanechá za sebou atom, který je schopen přijmout další elektron, a tím vytvořit díru, která se může pohybovat jako kladně nabitý nosič náboje. Tato schopnost polovodičů je klíčová pro jejich využití v elektronických zařízeních, jako jsou tranzistory, diody a integrované obvody. [2][3]

1.3 Polovodiče s nevlastní vodivostí typu N

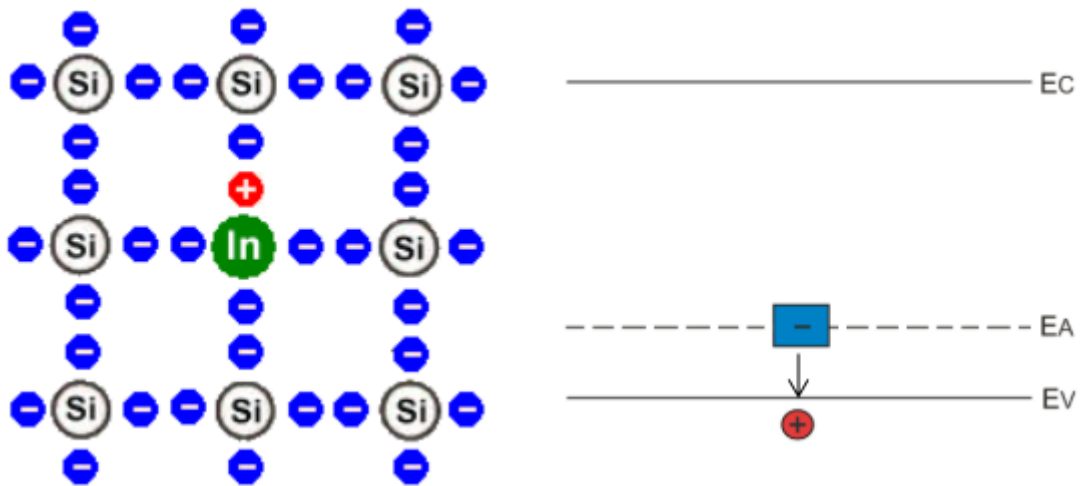
V přírodě se nenachází čistý dokonalý polovodič bez příměsí, proto je náročným procesem výroby a čištění uměle vytvářen. Avšak pro lepší elektrické vlastnosti jsou do materiálu zaváděny příměsové atomy, což se označuje jako dotování. Když se čtyřmocný polovodič, nejčastěji křemík nebo germanium, dotuje pětímocnými prvky jako je například fosfor, arsen nebo antimon, čtyři elektrony z těchto atomů vytvářejí vazby s okolními atomy. Příměsi, označované jako donory, obsahují volné elektrony, čímž vytvářejí tzv. donorovou hladinu E_D . Tato hladina je umístěna poblíž vodivostního pásma E_C , jak je vidět na pásovém modelu na obr. 2, což výrazně zlepšuje chování polovodiče a jeho schopnost vést elektrický proud. Pátý elektron je totiž volný a pro vytvoření chemické vazby potřebuje velmi malou energii. Takto nízká aktivační energie je dosažena již při nízkých teplotách, což umožňuje aktivaci většiny příměsí v polovodiči i při běžných pokojových podmínkách. [2][3]



Obr. 2 Vnitřní struktura polovodiče s nevlastní vodivostí typu N [3] a jeho pásový model [2]

1.4 Polovodiče s nevlastní vodivostí typu P

V případě polovodičů typu P jsou čtyřmocné polovodiče dotovány trojmocnými příměsemi (například indium, bor, galium, hliník). Tyto příměsi mají jen tři valenční elektrony, které se podílejí na vytváření kovalentních vazeb s okolními atomy v krystalové mřížce. Čtvrtý elektron, který je přebytečný, nemá partnera pro vytvoření vazby a vytváří tak volnou díru ve valenčním pásmu. Tyto díry charakterizují kladný náboj a hrají klíčovou roli v elektrické vodivosti polovodiče typu P. Akceptorové příměsi vytvářejí tzv. akceptorovou hladinu E_A , která se nachází těsně nad valenčním pásmem a přijímá elektrony z valenčního pásma. Akceptorová hladina je vyobrazena na obr. 3 Tato akceptorová hladina umožňuje elektronům překonat zakázaný energetický rozsah a přispívat k elektrické vodivosti polovodiče typu P. Akceptorové příměsi jsou aktivovány již při nízkých teplotách, což umožňuje polovodiči typu P dobrou vodivost i při pokojové teplotě. [2][3]



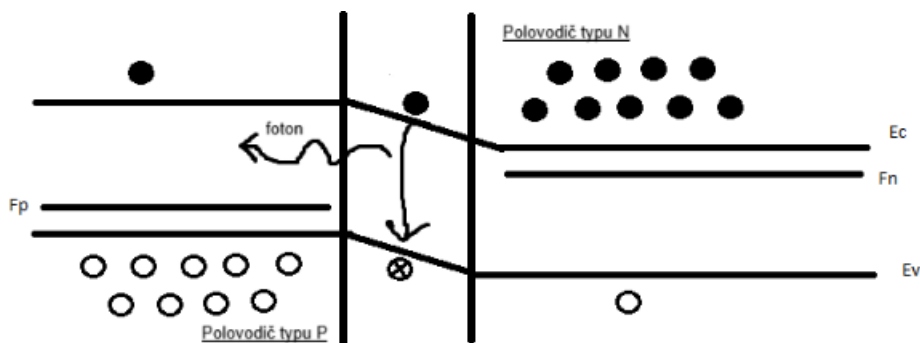
Obr. 3 Vnitřní struktura polovodiče s nevlastní vodivostí typu P [3] a jeho pásový model [2]

1.5 P–N přechod

K vytvoření aktivního p-n přechodu jsou potřeba dva polovodičové prvky různých typů a na ně přivedené elektrické napětí. Typy polovodičů se od sebe liší v převaze elektronů nebo děr, v případě polovodiče typu N jsou v početní převaze elektrony a v případě polovodičů typu P jsou v početní převaze díry. Vytvořením přechodu mezi těmito polovodiči vznikne na rozhraní oblast, ve které se elektrony a díry navzájem přitahují, difundují a rekombinují. Rekombinací je myšlen přechod elektronu z vyšší energetické hladiny za dírou na hladinu nižší neboli z vodivostního pásu do valenčního pásu. Uvolněná energie z přechodu, o velikosti něco větší, než je velikost zakázaného pásu, se ve formě fotonu vyzářuje do okolí.[4]

1.6 Princip funkce

LED diody jsou polovodičové součástky, kterými při přiložení elektrického napětí správné polaroty, začne procházet proud a v P-N přechodu dochází k rekombinaci elektronů a děr. V propustném směru diody se pásy mírně ohnou a způsobí vytvoření pomocných Fermiho hladin (F_n, F_p), kterými dojde ke snížení energie potřebné k přechodu, a tím se podstatně zvýší počet rekombinací.[4] V důsledku přesunu elektronu z vyšší energetické hladiny do nižší, elektron přebytečnou energii vyzáří v podobě fotonu do okolí.



Obr. 4 Rekombinace v P-N přechodu (v propustném směru diody [4] (upraveno)

1.7 Typy LED

Na trhu se nachází různé typy LED, které se liší především v konstrukci, výkonu a aplikacích, kde se používají. Mezi ně patří např.:

- DIP LED (Dual In-line Package LED),
- SMD LED (Surface Mount Device LED),
- COB LED (Chip on Board LED),
- RGB LED (Red – Green– Blue LED),

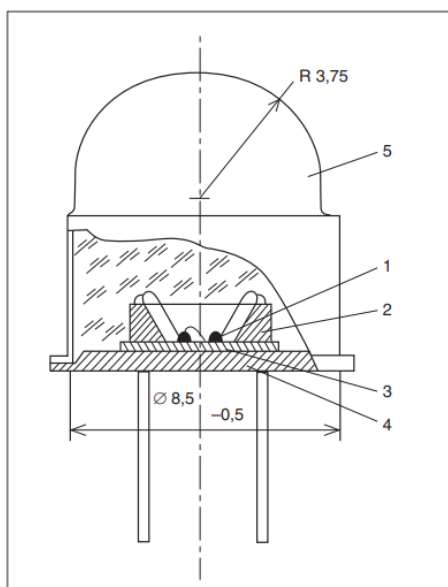
a další.

1.7.1 DIP LED (Dual In-line Package LED)

Technologie DIP je nejstarší sériově vyráběnou v oblasti LED, avšak z důvodu požadavků spotřebitelů na menší rozměry a větší kompaktnost jsou v této době upozadovány ostatními typy. Konstrukce tohoto typu diod je vcelku triviální. LED čip je umístěn v plastovém či keramickém pouzdře, ze kterého vychází dva kontakty – anoda a katoda.

Konstrukce DIP LED

Základ konstrukce je v jádře plastové čočky, která je vytvořena epoxidovou pryskyřicí pro krytí nejen před mechanickým poškozením, ale i prachem a vlhkostí (5). V tomto jádře je polovodič s přechodem PN (1). Pro lepší usměrnění fotonů vybuzených PN přechodem se navrhuje reflektor (2). Nevýhodou tohoto typu konstrukce je odvod tepla, který je zajištěn přes keramickou destičku (3). Vnitřní struktura LED je uzavřena podložkou (4), skrz kterou prochází dva elektrické vývody. [5]



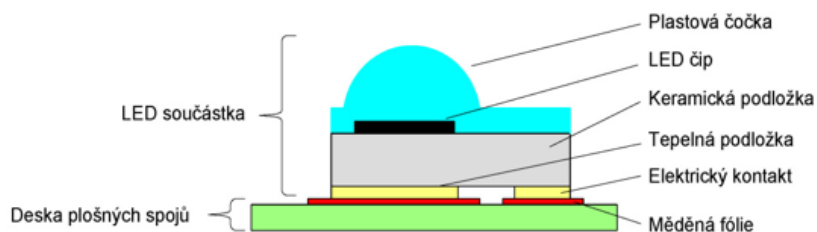
Obr. 5 Základní konstrukce DIP LED [5]

1.7.2 SMD LED (Surface Mount Device LED)

Jak již zkratka SMD napovídá konstrukce LED je umístěna na podložce z různých materiálů (např. plast, keramika atd.), kterou lze jednoduše připojit na desku plošného spoje. Tento typ LED se vyznačuje malým rozměrem. Využíván je v aplikacích, s výkonem jednotek wattů jako jsou např. osvětlovací aplikace s nižším světelným výkonem, mobilní zařízení, TV displeje a další.

1.7.2.1 Konstrukce SMD LED

Hlavní částí každé LED je čip, který je více popsán v kapitole 1.8.1. Ten zpravidla nemusí být jediný, ale mohou jich být desítky až stovky v případě COB LED, které mají podobnou konstrukci.[6] Na LED čipu může být nanesen luminofor a plastová čočka pro zlepšení světelných a krycích vlastností. Jelikož čipy, při průchodu proudem, jsou ohřívány, tak musí být ztrátové teplo odváděno přes keramickou podložku. LED součástka je elektrickým kontaktem provedeným prostřednictvím pájeného spoje připojená na desku plošných spojů. Motiv vytvořený nalisovanou měděnou fólií na desce plošných spojů zajišťuje elektrické napájení. Kromě elektrického propojení zajišťuje pájený spoj zároveň mechanické ukotvení součástky k desce. [6]



Obr. 6 Řez SMD LED [6]

1.7.3 COB LED (Chip On Board LED)

Typ COB LED je založen na umístění několika čipů na substrát (karbid křemíku nebo safír). Výhodou tohoto typu je především vysoká intenzita vyzařovaného světla, což vychází především z toho důvodu, že na čtvercovém poli o velikosti 10 x 10 mm je možné umístit až 38krát více čipů než u typu DIP a o 8krát více čipů v porovnání s technologií SMD. [7]

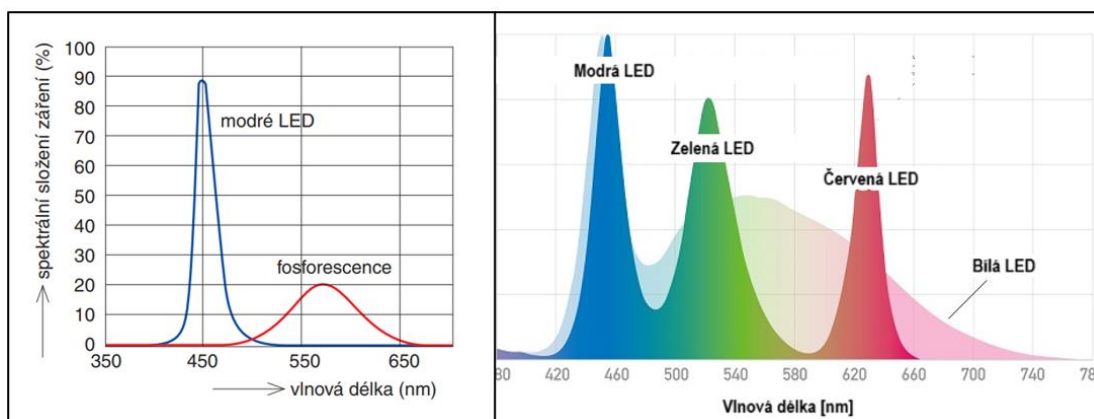
1.8 Koncepce LED světelných zdrojů

1.8.1 LED čip

LED čip je složen z nadotovaného polovodičového materiálu typu P-N, který při průchodu elektrického proudu vyzařuje fotony do okolí. Vyzářená energie má velice úzký rozsah vlnových délek, proto každý LED čip vyzařuje právě jednu spektrální barvu světla. Výslednou barvu součástky lze upravit celkovou konstrukcí LED. [6]

1.8.2 LED součástka

Pro zlepšení spektrálních vlastností LED čipu lze součástku konstruovat různými způsoby, a tak získat tzv. plnospektrální optické záření neboli bílé světlo. Jedním způsobem je spojení více čipů základních barev. Tyto LED součástky se nazývají RGB LED (red – green – blue LED), kde principem vytvoření monochromatické barvy je použití vhodného poměru kombinace těchto tří barev. S tímto způsobem přichází i některé problémy, kterými jsou například různé doby životnosti nebo nerovnoměrné degradace čipů a kontaktů. Dalším způsobem je využití modrého LED čipu překrytého vrstvou luminoforu (phosphor – converted LED), kde modré světlo vybudí luminofor, a tím se rozšíří spektrum a své maximum dosáhne v oblasti žluté barvy, což můžeme názorně vidět na obr. 7. [5][6][8]



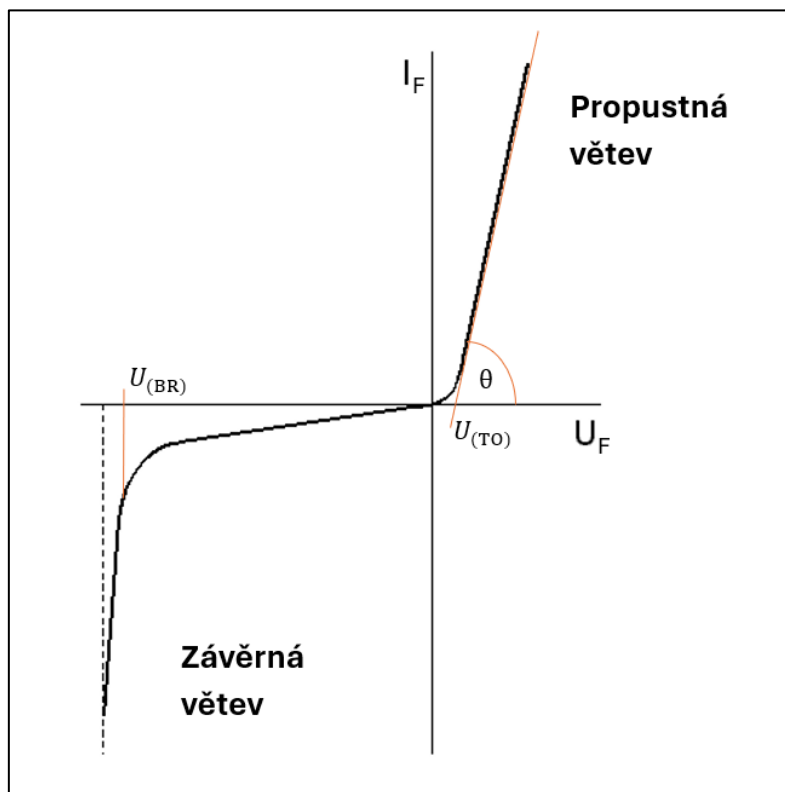
Obr. 7 Tvorba "bílé" LED, vlevo phosphor converted LED[5], vpravo RGB LED [9]

1.8.3 LED modul

Modulem je nazývána elektronická jednotka, která obsahuje více LED na jedné desce plošných spojů, které jsou spojené vodivými cestami. Tyto cesty jsou dané motivem nalisované mědi. Tím je také dáno jejich vzájemné zapojení. Moduly jsou důležitou součástí moderních svítidel a nahrazují tradiční svítidla.

1.9 V-A charakteristika

Na obr. 8 je Volt – Ampérová charakteristika diody, která vyjadřuje vztah mezi napětím na diodě a odpovídajícím protékajícím proudem. Charakteristika se dělí na dvě části, a to na propustnou větev neboli větev ve směru, ve kterém dioda umožňuje průchod elektrického proudu s minimálním odporem, a na závěrnou větev neboli větev blokovácí. Pro tu platí, že je nastavena opačná polarita a dioda blokuje proud. V tomto směru se ovšem nesmí překročit průrazné napětí $U_{(BR)}$, při kterém by došlo k průrazu elektrickým proudem, a tím ke zničení PN přechodu. [10]



Obr. 8 V-A charakteristika diody

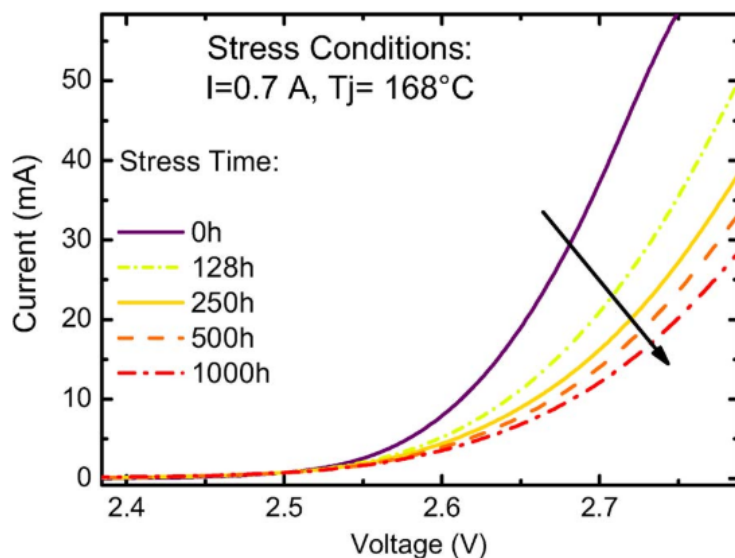
Z charakteristiky je určován diferenciální odpor r_F , a to jako tangentu úhlu θ svíraného přímkou, která kopíruje lineární trend charakteristiky v propustném směru, a osou proudu I_F . Dalším podstatným parametrem, který uvádí V-A charakteristika je prahové napětí $U_{(TO)}$. Toto napětí určuje minimální napětí na svorkách diody potřebné pro průchod elektrického proudu PN přechodem diody. Je určeno průnikem napěťové osy stejnou přímkou jako při určení r_F . [10]

Po definování těchto parametrů charakteristiky, lze popsat propustnou větev charakteristiky vztahem [10]

$$u_F = U_{(TO)} + r_F * i_F. \quad (1.1)$$

1.9.1 Vliv sériového odporu na V-A charakteristiku

V průběhu života LED působí na diodu různé vlivy okolí, a tak ovlivňují i její výslednou charakteristiku. Posun charakterizuje sériový odpor, který reprezentuje například změnu teploty, degradaci kontaktů a další faktory spojené s dobou životnosti LED. [10] V několika studiích, které se zabývaly změnou sériového odporu. Autoři studií připisují jeho změnu zhoršením vodivosti materiálu typu P. To se projeví na charakteristice, tak jak je vidět na obr. 9. Zhoršená funkce akceptorů vede k nárůstu operačního napětí, a tím k posunu V-A charakteristiky. Uvedené zhoršení má také vliv na snížení světelného toku. [23]



Obr. 9 Změna V-A charakteristiky vlivem zvýšení sériového odporu po různě dlouhém zatížení [23]

1.10 Světelně technické veličiny

1.10.1 Spektrometrické veličiny

Spektrometrické veličiny popisují vlastnosti světla, zejména pak spektrum světelného záření, které je pro optiku a pro tuto práci důležitým pojmem. Do této skupiny veličin se řadí spektrální hustota intenzity záření a spektrální citlivost a odezva.

1.10.1.1 Spektrální hustota intenzity záření

Spektrální hustota intenzity záření $H(\lambda, T)$ popisuje množství energie vyzářené zdrojem pro určitou vlnovou délku λ a při teplotě T . Lze popsat vztahem [11]

$$H(\lambda, T) = \frac{dH}{d\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right)} \left(\frac{J \cdot s}{m^2} \right), \quad (1.2)$$

kde h je Planckova konstanta: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, c je rychlost světla, k je Boltzmannova konstanta: $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$.

1.10.1.2 Spektrální citlivost a odezva

Spektrální citlivost a odezva jsou veličiny popisující, jak dobře a rychle reaguje senzor na záření o různých vlnových délkách. V aplikacích se využívá spektrální citlivost a odezva senzoru na změnu barvy záření pro zlepšení kvality obrazu např. ve fotoaparátech. [11]

1.10.2 Fotometrické veličiny

Speciálním případem senzoru je možné brát i lidské oko, proto se zavádějí fotometrické veličiny, které zohledňují citlivost lidského oka a zaměřují se na světlo viditelné pouhým okem.

1.10.2.1 Světelný tok

Světelný tok Φ popisuje množství světla, které vysílá zdroj do okolí. Je měřen pomocí fotometru, který umožňuje měřit intenzitu světla v určitém prostorovém úhlu. Prostorový úhel popisuje úhel, pod kterým je pozorovatel schopen vidět zdroj světla. Jednotkou světelného toku je lumen (lm). Světelný tok patří do skupiny veličin, které se využívají při výpočtech a návrzích na osvětlení. [8][11]

1.10.2.2 Osvětlení

Osvětlení E vychází ze světelného toku zdroje světla, který dopadá na určitou plochu. Lze popsat vztahem [11]

$$E = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}, \quad (1.3)$$

kde Φ je světelný tok a S je plocha na, kterou dopadá světlo ze zdroje.

Jednotkou světelného toku je $\frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$, neboli lux (lx).

1.10.2.3 Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti záření T_c udávaná v Kelvinech se využívá pro přesnější popis barevného spektra. Teplota chromatičnosti popisuje spektrum světla pomocí absolutně černého tělesa, jehož záření má stejnou chromatičnost jako uvažované záření. Podle teploty chromatičnosti se bílé záření dělí na teplou, neutrální a studenou barvu, kde teplé bílé světlo má méně než cca 3500 K a studené bílé světlo se hodnotami pohybuje nad 5000 K. [8]

1.10.2.4 CRI – index podání barev (Colour rendering index)

Mezi další spektrální veličiny patří index podání barvy R_a , který nabývá hodnot 0 až 100 (nerozpoznatelné barvy až věrný vjem barev), kde 0 znamená, že barvy nejsou rozpoznatelné, a 100 znamená, že světlo věrně podává barvy. Tento index poskytuje informace o tom, jak spolehlivě světlo zobrazuje barvy v porovnání s referenčním světlem. CRI je udáván výrobcem, ale lze spočítat se znalostí spektra světelného zdroje a dalších veličin, které jsou vypsány v [12], a kde je obecně vysvětlen tento výpočet krok po kroku.

1.11 Degradace LED

V elektrotechnice se setkáváme a musíme počítat s určitou degradací všech zařízení i jejich komponent, přičemž světelné zdroje toho nejsou výjimkou. Ačkoli LED zdroje mají dlouhou životnost, tak v provozu jsou vystavovány různým provozním podmínkám, jejichž dopad na vlastnosti LED zdrojů závisí mimo jiné na konstrukci svítidla a proudové zátěži. V průběhu života se postupně zhoršují světelné vlastnosti i za provozu v ideálních podmínkách. Působením vnějších vlivů je degradace LED součástek rychlejší a může končit až úplným selháním svítidla. Mezi hlavní faktory, které podporují degradační mechanismy patří:

- teplota v okolí
- teplota uvnitř svítidla
- vlhkost
- proudové zatížení.

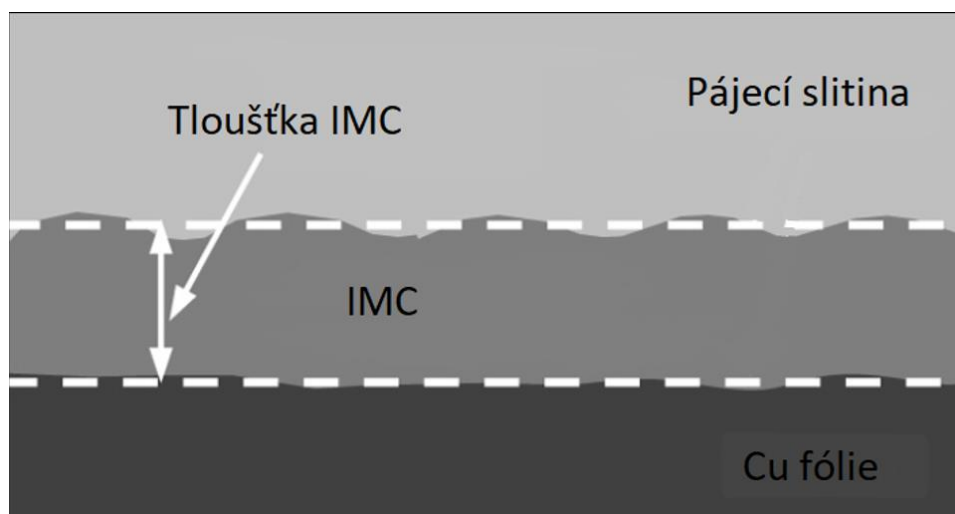
Degradaci lze zpomalit vhodným návrhem svítidla pro danou aplikaci. Degradaci mohou trpět specifické části konstrukce, kterými jsou přírady, samostatné LED čipy, epoxid, luminofor atd. [2][13][14][15]

Obal LED čipu je tvořen vrstvou epoxidu nebo silikonového plastu, který má za úkol chránit čip LED. Při nadměrném tepelném namáhání nebo expozici UV záření může epoxidový obal žloutnout. Tento proces může mít za následek absorpci některých vlnových délek záření, což může vést ke zhoršení světelné účinnosti diody. Dalším faktorem může být mechanické namáhání způsobené tepelnou expanzí obalu. Když se epoxidový obal rozpíná, vnitřní části diody jsou vystaveny zvýšenému mechanickému napětí. To může vést k porušení wirebonding drátků nebo dalších komponentů v diodě. Přirozené stárnutí součástky může vést k degradaci luminoforu, a zvýšená teplota může tento proces urychlit. Výsledkem může být snížení světelného výkonu LED diody, zejména pokud je použit nekvalitní nebo nedostatečně stabilní luminofor. [2][13][14][15]

Ovšem toto tepelné namáhání není vytvářeno pouze vnějšími vlivy, ale průchod proudu generuje ohřev diody. Tento ohřev způsobuje zvýšení teploty v okolí aktivního prostoru diody, což může mít několik důsledků. Kombinací cyklického tepelného zatížení s proudovým může výrazně zhoršit tepelné a mechanické změny ve struktuře LED. Z těchto důvodů je důležité správně navrhnout svítidla a jejich chlazení, aby se minimalizovali tyto negativní vlivy vysoké teploty v okolí LED. [2][13][14][15]

1.11.1 Intermetalická vrstva IML (Intermetallic layer)

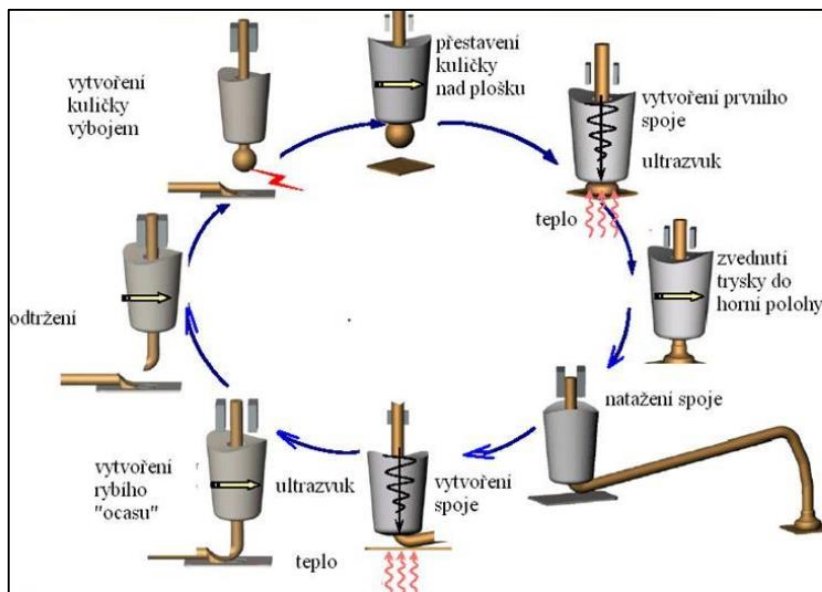
V pájeném spoji na rozhraní pájecí slitiny a pájecí plošky tvořeném mědí vzniká difúzí na rozhraní materiálů tzv. intermetalická vrstva zkráceně IML. Ta je důležitou součástí pájeného spoje, ale má jiné vlastnosti, než původní prvky či slitiny, ze kterých vzniká. Typickou vlastností IMC (intermetallic compound) vrstvy je její křehkost, čímž se snižuje odolnost proti mechanickému namáhání a vibracím. Tloušťka IMC vrstvy se mění v průběhu života pájeného spoje a je závislá na mnoha faktorech. Mezi aspekty udávající tloušťku IMC vrstvy při formování pájeného spoje lze zařadit typ pájecí slitiny, průběh pájecího procesu (zejm. teplotní profil) a povrchovou úpravu, která chrání pájecí plochy před oxidací mědi, než dojde k zapájení součástek. Hlavním faktorem ovlivňující tloušťku vrstvy IMC v samotném provozu je teplota. Proto je v poslední době velmi zkoumaným jevem růst této vrstvy a její vliv na životnost pájeného spoje, a tím i celého zařízení. [16]



Obr. 10 Schématické znázornění intermetalické vrstvy

1.11.2 Wirebonding

V mikroelektronice je velice významná technologie wirebondingu využívána pro přívod elektrického proudu na polovodičové součástky či propojení součástek v logických obvodech. Celý proces vytváří elektrické spojení mezi čipem a kontaktem pomocí velmi tenkého drátku o průměru pár desítek mikrometrů. V oblasti LED výroby je využíván typ termosonického kuličkového bondování. Jeho principem je roztavení konce drátku působením tepla a vibrací, tím se vytvoří kulička na konci drátu a poté je pomocí ultrazvuku a tlaku připojena na požadované místo na desce, která je přehřívána pro lepší podmínky spojení. Poté se hlavice přesune směrem k druhému místu kontaktu a tam se opět provede stejný postup s kuličkou a dojde k připojení.[17]



Obr. 11 Schéma vytvoření elektrického kontaktu technologií termosonického wirebondingu [25]

Ke kontaktování jsou používány různé materiály drátků (zlaté, stříbrné, měděné). Každý materiál má svoje výhody, nevýhody a změny vlastností po degradaci. Více o chování během degradace lze nalézt na [17], kde se zajímali také o růstu IMC vrstvy na rozhraní drátu a podložky.

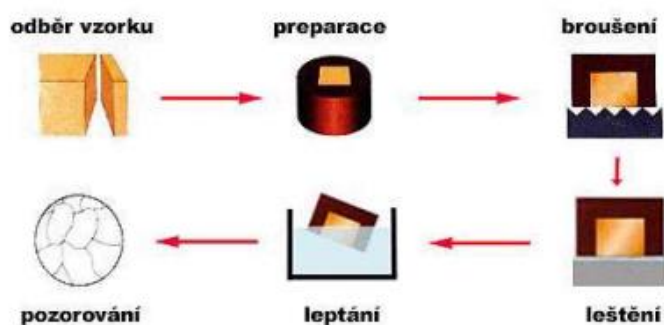
Matr. Type \ Aging	Au	Ag	Cu
0hr			
24hrs			
48hrs			
96hrs			
144hrs			
192hrs			
240hrs			
366hrs			
504hrs			

Obr. 12 Porovnání růstu IMC vrstev u wire-bonding materiálů (Au, Ag, Cu) [17]

KAPITOLA 2: METALOGRAFIE

Cílem metalografie je odebrat a zkoumat vzorek charakterizující daný materiál nebo výrobek na makro – mikro struktury. Účelem metalografie je zjistit z vnitřní struktury, převážně vzorků kovů, jeho vlastnosti nejen využitelné v technickém odvětví. Struktura kovů je pro technické obory klíčová nejen z hlediska průběžné kontroly materiálů při výrobě, ale také hledání a následné řešení chyb vzniklých při zpracování. Metalografii lze ovšem využít i v přírodovědných oborech, jako je například geologie, kde se na místo kovů zkoumají například horniny různých druhů. [18][19][21]

Pro správnou kvalitu metalografického výbrusu je nutné dodržovat správný a precizní postup jednotlivých kroků. Tyto kroky budou postupně podrobněji rozebrány. Mezi ně patří samotný odběr vzorku neboli odstranění přebytečných částí vzorku. Poté následuje preparace, která zajistí lepší manipulaci se vzorkem do dalšího postupu. Dalším krokem je broušení a leštění, což jsou dva velmi důležité kroky, které mají velmi podobný postup, ale je potřeba je rozlišit. Posledním krokem přípravy metalografického výbrusu je leptání, při kterém se lépe zviditelní struktury pro následné pozorování. Finální vzorky se zpravidla pozorují různými mikroskopy, které se liší principem funkce. [18][19][21]



Obr. 13 Schéma přípravy metalografického výbrusu [20]

2.1 Odběr vzorku

Zkoumaný vzorek musí být nejprve upraven tak, aby se s ním lépe pracovalo s ohledem na procesy dalšího zpracování. Toho se dá docílit různými postupy, jako je řezání, frézování, vrtání, rozbrušování aj. Při těchto úpravách se musí dohlížet na vedlejší účinky při zpracovávání, jako například teplo, které vzniká převážně u tvrdých materiálů. Na teplo je potřeba velmi dbát i u materiálů s nízkou teplotou tání. Je tedy potřeba uzpůsobit tomu pracovní prostředí a vzorek dostatečně chladit. [18][19][20][21]

2.2 Preparace vzorku

Preparace je využívána u malých vzorků, se kterými by bylo velmi problematické pracovat v dalším postupu. Preparaci vzorku lze provést dvěma hlavními způsoby, za studena a za tepla. Volba preparace závisí na materiálu, ze kterého je vzorek vyroben. Preparaci za tepla nelze využít u všech materiálů z důvodu změny vnitřní struktury vzorku při velkém zahřátí. Výsledkem preparace je zalitý vzorek, který je poté rozříznut, aby byl vytvořen řez, který bude plně charakterizovat zkoumaný materiál/vzorek. [18][19][20][21]

2.2.1 Preparace za studena

Preparací za studena je myšleno zalití vzorku kapalinou do vyhovující nádoby. Mezi nejčastější zalévací hmoty patří dvousložkové epoxidové pryskyřice s různými příměsmi, které

je potřeba při zalévání do nádoby lít plynule, aby nedošlo k vytvoření vzduchových bublin, a hmota dobře přilnula k povrchu vzorku. Pryskařice po určité době ztuhne a vzorek spolu se ztuhlou hmotou se vyjme z nádoby. Poté je odstraněna přebytečná část, čímž je vytvořena hrana, se kterou je po zbytek pracováno. Při odřezávání přebytku je třeba dbát na co nejkolmější řez, aby se při pozorování nevyskytlo určité zkreslení šikmého řezu. [18][19][20][21]

2.2.2 Preparace za tepla

„Preparace za tepla se používá u vzorků, u kterých nehrozí ovlivnění struktury teplem, a provádí se tak, že se vzorek umístí do vyhřívané "tlakové nádoby" a je zasypán práškem ze speciálního polymeru. Tato hmota se při současném působení zvýšené teploty a tlaku roztaví a dokonale obklopí studovaný vzorek.“ [20]



Obr. 14 Preparace za studena (vlevo) preparace za tepla (vpravo) [20]

2.3 Broušení

Po hrubém vytvoření hrany v předešlém kroku, se broušením odstraní nerovnosti. Toho lze dosáhnout různými způsoby, mezi které patří ruční, poloautomatické či plně automatické broušení. Avšak všechny způsoby začínají správným zvolením brusného papíru, který se liší různou velikostí brusných zrn. Volba rovněž závisí na tvrdosti materiálu. Při broušení vzorku se musí dbát na spoustu dalších faktorů, které mohou poškodit povrch řezu. Po dobroušení brusným papírem s nejjemnější zvolenou zrnitostí, je potřeba zbavit povrch zaseklých částic brusiva v pórech pomocí ultrazvukové čističky. [18][19][20][21]

2.3.1 Druh povrchu brusného kotouče a velikost a tvar částic brusiva

Na povrchu brusného kotouče se nacházejí částice brusiva, které mají tvar nepravidelných mnohostěnnů. Tyto částice se při rotaci kotouče zasekávají do povrchu vzorku a odebírají třísky materiálu. Částice brusiva mohou být na kotouči na pevně anebo se po kotouči volně pohybují (lapování). [18][21]

2.3.2 Postupné snižování zrnitosti

Při postupném snižování zrnitosti zamezíme možnému problému s vytvořením hlubokých rýh, které mohou vadit při finálním pozorování. Principem je opakuji se postup pouze se změnou jemnosti zrnitosti použitého brusného papíru. [18][21]

2.3.3 Velikost přítláčné síly a rychlost otáčení kotouče

Tyto dva faktory se velmi dobře regulují v poloautomatickém broušení pomocí brusné hlavy. Zde se vzorky upevní a následně se nastaví velikosti parametrů přítláčné síly, rychlost otáčení brusného kotouče a čas, po který se vzorek brousí. Avšak při ručním broušení to nelze přesně definovat, proto může docházet k nehomogenitě povrchu v řezu. Při nízké přítláčné síle může docházet k nedostatečnému odstranění materiálů nebo naopak při velké přítláčné síle dochází

k tvorbě hlubokých rýh. Velmi důležité je nejen najít optimální tlak při broušení, ale i rychlost otáčení kotouče, která se liší pro různé druhy brusných kotoučů. [18][20][21]

2.3.4 Použité smáčedlo, chladící médium a Beilbyho vrstva

Smáčedla a chladící média se využívají při broušení k prevenci Beilbyho vrstvy, která je tvořena v důsledku zvýšené teploty při mechanickém broušení, kde teplota způsobí částečné tavení materiálu na povrchu. Tato vrstva následně negativně dopadá na finální optické pozorování. [18][20]

2.3.5 Ruční broušení

Ruční broušení je nejen časově, ale i fyzicky náročný postup při broušení metalografického výbrusu. Při této metodě je připevněn brusný papír na rovnou plochu a pracovník musí posouvat vzorkem po papíře. Postup se opakuje jen s rozdílným brusným papírem se stále jemnější zrnitostí. Proces se provádí do té doby, než je dosažena homogenita a jemnost hrany. [18][21]

2.3.6 Poloautomatické broušení

Poloautomatické brusky jsou vylepšeny oproti ručnímu broušení o točící se kotouč, na který se připevňuje brusný papír s odpovídající zrnitostí. Na brusnou plochu vede přívod chladícího média. Pro tuto metodu je potřeba buď pracovník, který hýbe metalografickými výbrusy proti směru otáčení kotouče, nebo bruska s rotačním ramenem s nastavitelnými držáky. Výhodou těchto rotačních hlav je dobrá regulace přítlačné síly a rychlosti otáčení kotouče s brusným papírem. Do nastavitelných držáků lze uchytit současně více výbrusů. I přes tyto výhody je nutná asistence pracovníka, který nastavuje náležité parametry a mění brusné papíry. V aplikacích, kde je potřeba nalézt přesné místo řezu, například řez malou součástkou, je broušení bez rotační hlavy správná volba. [18][21]

2.4 Leštění

V této fázi úpravy povrchu výbrusu se odstraňují zbylé rýhy z předchozího broušení. Leštění se provádí na stejné brusce jako broušení s tím rozdílem, že pro leštění se používá textilní kotouč v kombinaci s leštícím médiem, který obsahuje různé velikosti brusných zrn. Jak napovídá název leštění, vzorek je opracováván do té doby, než je povrch lesklý a zbaven velkých rýh a nerovností. [18][20][19][21]



Obr. 15 Příklad poloautomatické brusky [22]

KAPITOLA 3: PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 Představení

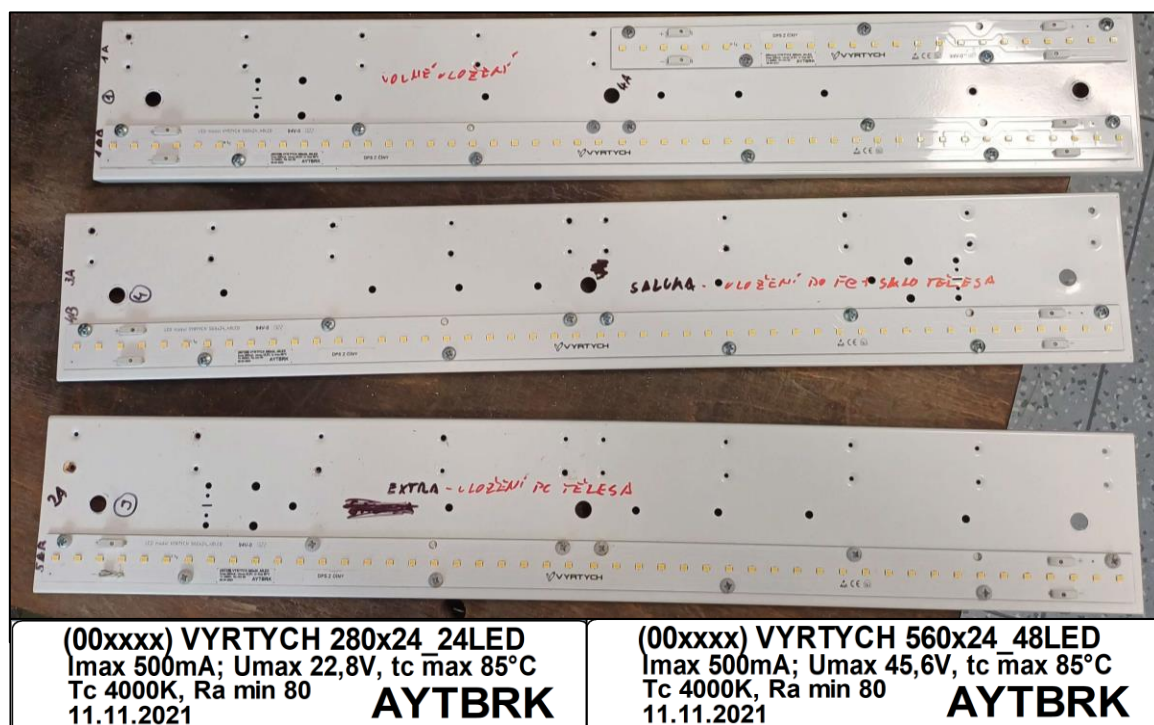
V praktické části bakalářské práce bude prováděn návrh a realizace různých testů a zkoušek různě degradovaných vzorků LED. Cílem této části je získat informace o tom, jak se degradace LED projevuje na jejich vlastnostech a jak se mění při různém zapouzdření LED modulů. V rámci této práce bude prováděna analýza vyzařovaných spekter LED, Volt – Ampérové charakteristiky a pozorování změn ve vnitřní struktuře LED (čipy, kontakty).

3.2 Použité LED

Vzorky LED byly odebrány z modulů firmy Vyrtých a.s. Přesněji z modulů, které mohou reprezentovat různá prostředí specifická pro jejich aplikace. Proto použité LED vzorky byly vystaveny cyklickému klimatickému namáhání, aby byla zajištěna jejich podobná degradace jako při reálném stárnutí. Do klimatické komory byly vloženy stejné LED moduly na kovových lištách s různým typem zapouzdření, s rozměry vypsány na štítku na obr. 16. V tab. 1 jsou vypsány vybrané hodnoty z datasheetu, které udává výrobce samostatných LED čipů.

Různým zkouškám jsou podrobeny náhodně zvolené samostatné LED čipy z modulů takto uložených:

- LED modul uložen v kovovém tělese – označení vzorků: I.
- LED modul uložen v plastovém tělese (polykarbonát) – označení vzorků: II.
- LED moduly volně uloženy (bez ochranného tělesa) – označení vzorků: III. a IV.
- LED modul nedegradovaný (referenční) – označení vzorků: V.



Obr. 16 Měřené vzorky a jejich štítkové hodnoty (vlevo pro krátký LED modul a vpravo pro delší LED modul)

Middle power LED, 0,5W (2,8 x 3,5 mm)	
Dopředné napětí (U _f)	2,6 - 2,7 V
Dopředný proud (I _f)	200 mA
Maximální pulzní proud	300 mA
Teplota chromatičnosti	4000 K
Světelný tok pro 65 mA a Ra = min. 80	35 - 37 lm
Skladovací/provozní teplota	-40 – (+85) °C

Tab. 1 Vybrané štičkové hodnoty LED

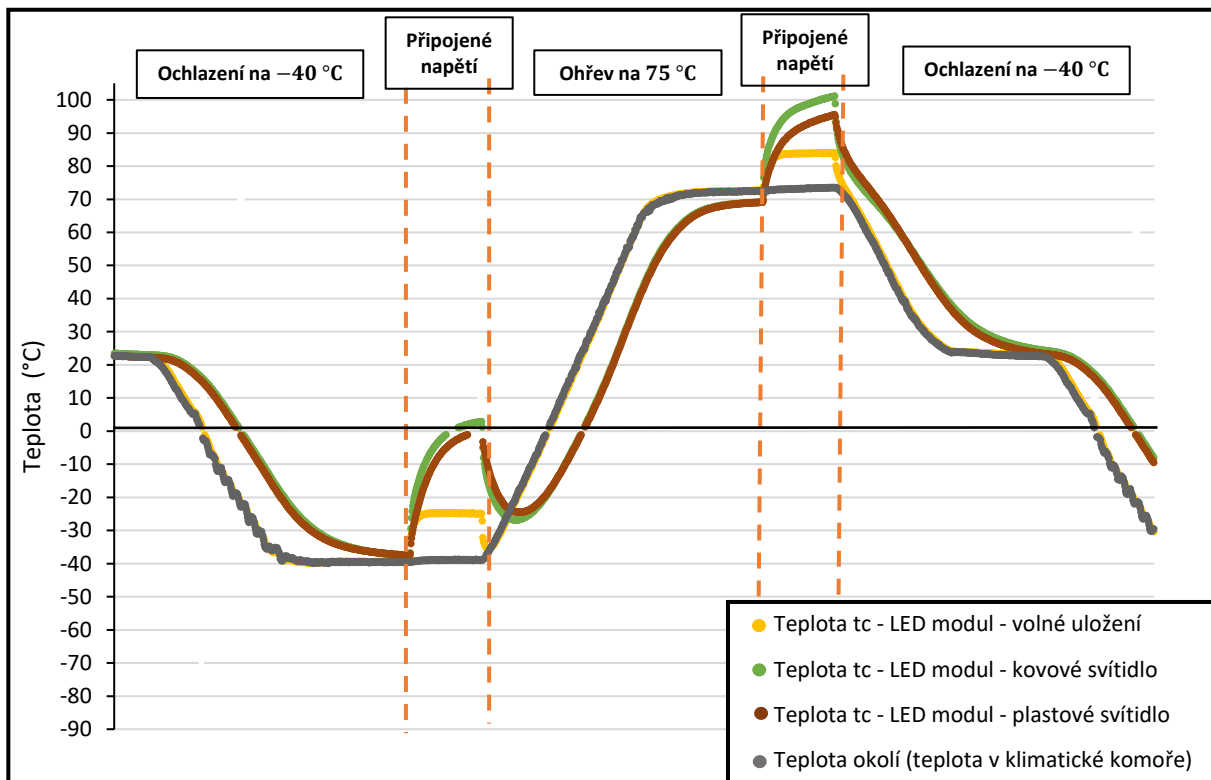
3.3 Klimatické zkoušky (proces degradace)

Vystavením vzorku cyklickému klimatickému namáhání lze simulovat zrychlenou degradaci včetně změn teplot, vlhkosti a jiných faktorů působících na vzorek. Proto jsou tyto zkoušky využívány ve výzkumu a diagnostice pro dřívější identifikaci a analýzu důležitých faktorů, které v průběhu života zařízení mohou způsobit dřívější vyřazení z provozu.

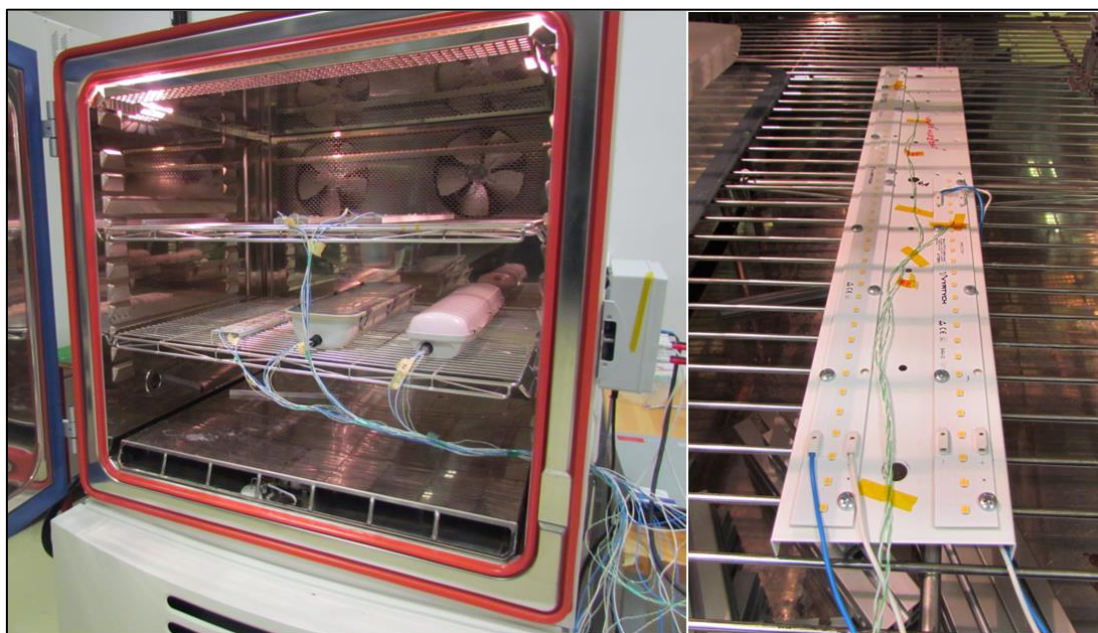
V této práci bylo žádoucí ověřit funkčnost LED vzorků v klimatických podmínkách odpovídajících podmínkám maximálním možným, které v současné době výrobci udávají. Do klimatické komory byly vloženy LED moduly na lakovaných kovových lištách a připojeny k nominálním hodnotám napětí a proudu. Vložení vzorků do klimatické komory je vidět na obr. 18. Cykly byly nastaveny na konstantní ohřev na 75 °C po dobu 45 minut, přičemž posledních 15 minut bylo přivedeno elektrické napětí, a chlazení na teplotu -40 °C, taktéž 45 minut a posledních 15 minut byly vzorky elektricky namáhány. Těmito přechody teplot se díky vlhkosti v pouzdru modulu a v okolním prostředí vyvolává kondenzace na povrchu vzorků. Průběh teplotního profilu změřeného termočlánky umístěnými na LED modulech je vyneseno na obr. 17. Z těchto průběhů je znatelné, že nejvyšších teplot dosahovali LED moduly v plastovém a kovovém tělese při přiložení napětí. Naopak průběh LED modulu volně vloženého kopíruje teplotu v klimatické komoře. Pouze při přiložení elektrického napětí se teplota o pár stupňů zvýšila.

Průběh cyklů:

1. část (150 cyklů) – ohřev: $t = 75 \text{ °C}$ / relativní vlhkost = 70 %
chlazení: $t = -40 \text{ °C}$ / temperace: 23 °C / relativní vlhkost = 50 %
2. část (150 cyklů) – ohřev: $t = 80 \text{ °C}$ / relativní vlhkost = 80 %
chlazení: $t = -40 \text{ °C}$ / temperace: 23 °C / relativní vlhkost = 50 %



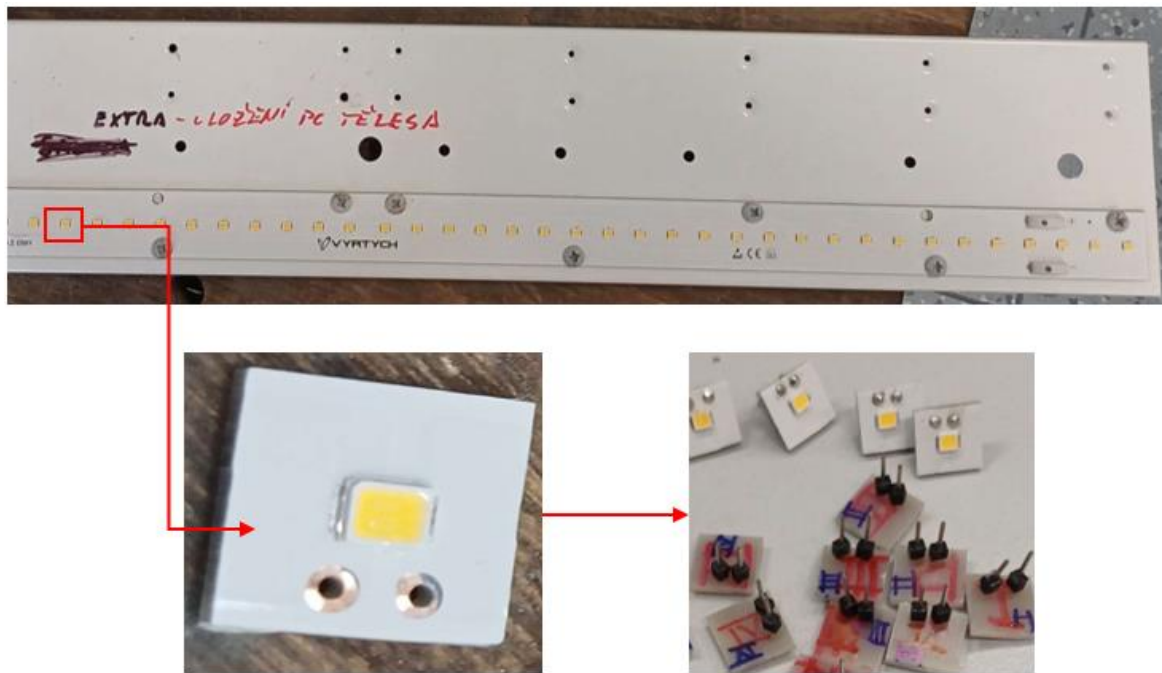
Obr. 17 Teplotní profil jednoho cyklu pro jednotlivé vzorky



Obr. 18 Vložení vzorků do klimatické komory

3.4 Příprava vzorků pro měření světelně technických veličin a V-A charakteristiky

Od firmy Vyrtych a.s. byly poskytnuty degradované LED moduly, které byly pro potřebu pozorování a diagnostiky LED rozděleny na jednotlivé LED součástky. Z pěti různě degradovaných modulů byly z každého odebrány a nakontaktovány náhodně zvolené vzorky, aby bylo možné provést měření Volt - Ampérové charakteristiky a fotometrických veličin. Po rozdělení jednotlivých diod byla vyfrézována izolace měděné fólie a vyvrtána díra pro vyvedení kontaktu čipu. Poté byly vývody připájeny bezolovnatou pájkou metodou selektivního pájení. Při pájení byla snaha o co nejmenší teplotní výkyv, a tím co nejméně ovlivnit degradaci LED čipů a výsledky měření.



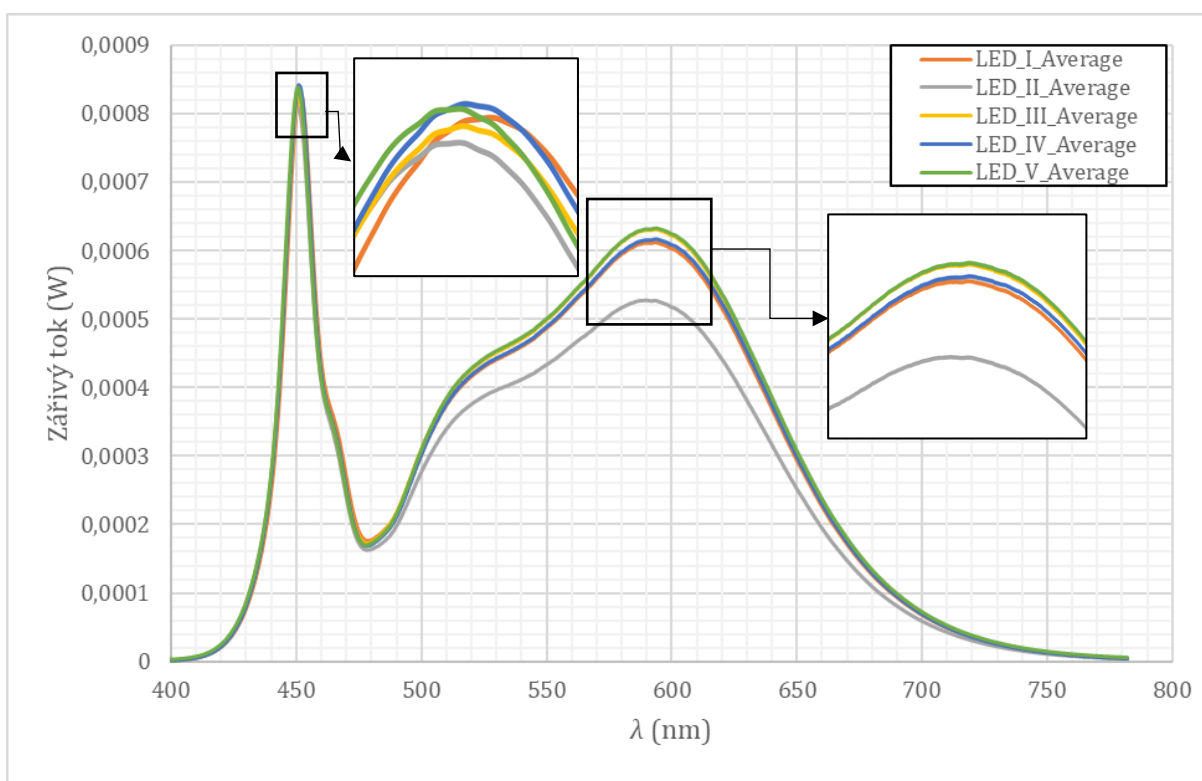
Obr. 19 Příprava vzorků na experimentální část

3.5 Vyhodnocení provedených zkoušek

3.5.1 Měření fotometrických veličin

Pro měření bylo vyrobeno a nakontaktováno pět vzorků od každého typu neboli od každého uložení LED modulu do typického krytí pro aplikace LED. Měření všech vzorků probíhalo po dobu 2 minut, přičemž bylo přiložené napětí o velikosti 2,74 V a vzorky protékal proud 65 mA.

Graf vyzařovaných spekter zkoumaných LED, který můžeme vidět na obr. 20, byl sestaven z naměřených dat z kulového integrátoru, na kterém bylo měření prováděno. Pro vynesení grafu s přehlednými výsledky bylo provedeno průměrování výsledků pro vzorky ze stejných modulů.



Obr. 20 Graf vyzařovaných spekter zkoumaných LED

Z obr. 20 a tab. 2 je zřetelné největší zhoršení vyzařovaného spektra vzorku LED_II, což je LED modul vložený do plastového tělesa. Celkový zářivý tok takto uložených vzorků se zmenšil o necelých 13 % oproti nedegradovanému vzorku s názvem LED_V. To by mohlo být způsobeno velkým tepelným namáháním a zároveň vlivem okolní vlhkosti a následné kondenzaci, která vzniká ochlazením na modulu. Díky tomuto namáhání se snižuje účinnost krycí epoxidové pryskyřice a luminoforu, a tím i zhoršují spektrální vlastnosti. Ostatní LED moduly měly velmi podobné naměřené hodnoty. V tomto případě je možné říci, že degradace neměla vliv na světelné parametry u volně vložených vzorků a vložených do kovového tělesa.

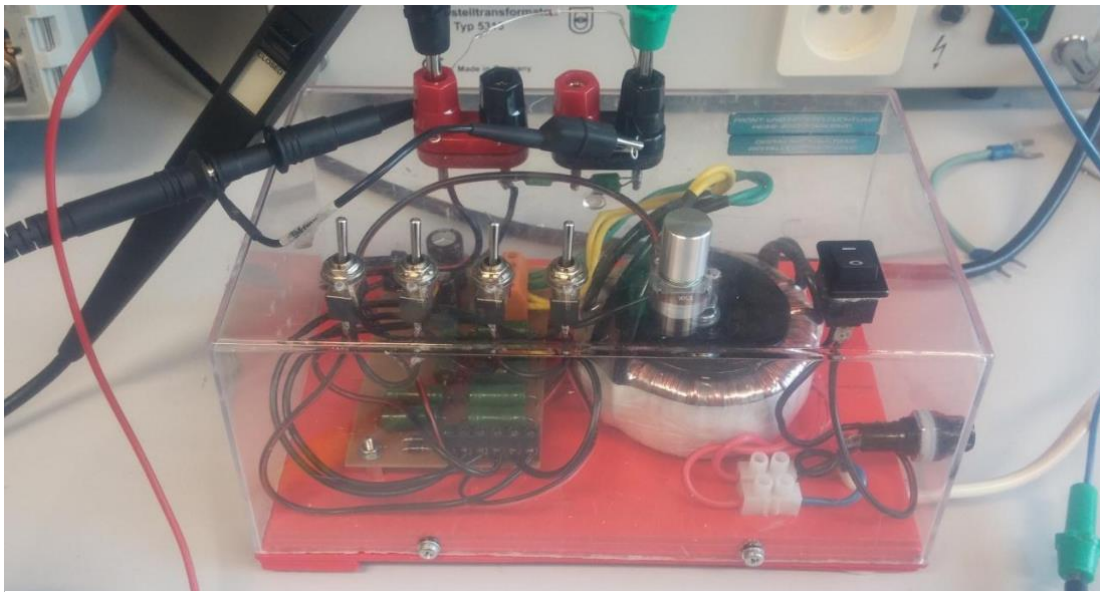
Označení vzorku	Max. vlnová délka (nm)	Max. spektrální hodnota (W/nm)	Teplota chromatičnosti (K)	Celkový zářivý tok (W)
LED_I_AV	451,5	8,32E-04	4143,4	0,1069
LED_II_AV	450,8	8,13E-04	4384	0,0957
LED_III_AV	451,2	8,27E-04	4087,6	0,1093
LED_IV_AV	451,1	8,42E-04	4113,6	0,1077
LED_V_AV	450,7	8,42E-04	4076,8	0,1096

Tab. 2 Tabulka významných hodnot z naměřených dat vyzařovaných spekter

3.5.2 Měření V-A charakteristiky

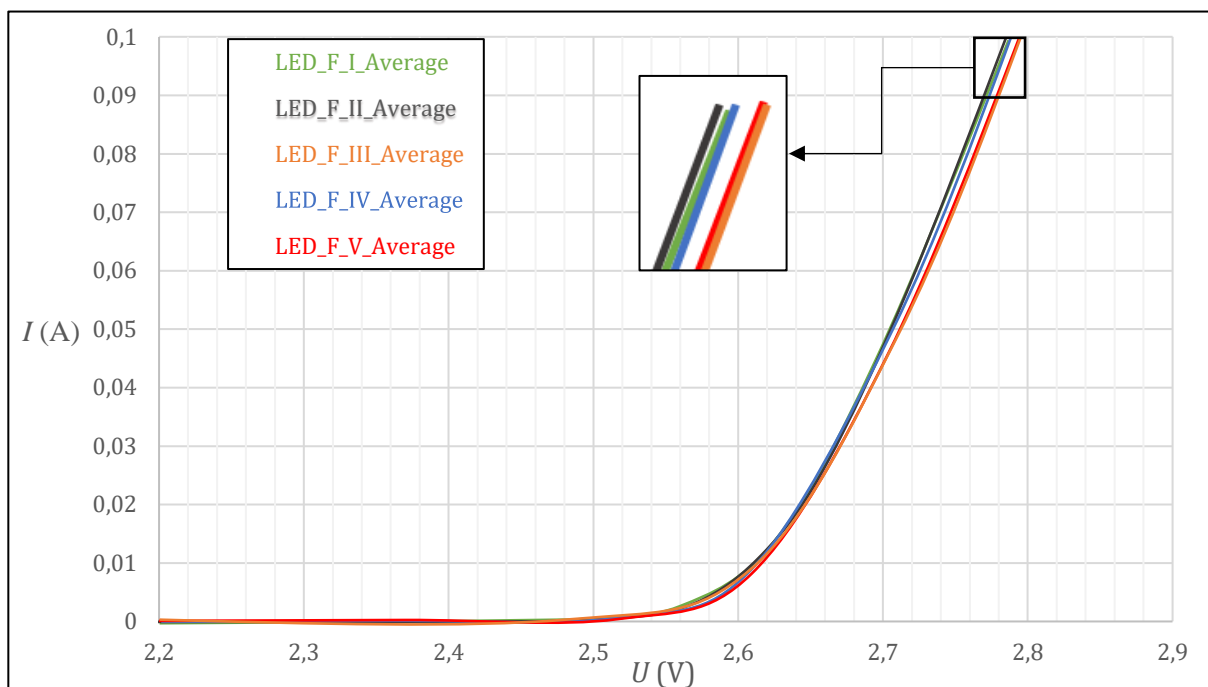
Dalším měřením, které bylo navrženo pro testování a ověření parametrů degradovaných LED vzorků jsou V-A charakteristiky. Měření probíhalo po dobu nezbytně nutnou, aby výsledky nebyly ovlivněné zahřátím LED čipů, a tím ovlivněním výsledných průběhů V-A charakteristik. Zkoumaný vzorek byl připojen k napájení a pomocí přípravku, který je na obr. 21. Připojený osciloskop naměřil hodnoty, z kterých byla vytvořena V-A charakteristika pro jednotlivé vzorky.

Pro toto měření byly vytvořeny a nakontaktovány tři vzorky od každého zkoumaného typu vložení LED modulů. Po prvním zpracování hodnot bylo provedeno měření dalších pěti vzorků, které byly využity v měření světelných technických veličin. Hlavním důvodem pro rozšíření počtu vzorků bylo snížení korekčního koeficientu, a tím snížením standardní nejistoty typu A na téměř zanedbatelné hodnoty.



Obr. 21 Přípravek pro měření V-A charakteristiky

Z teoretického úvodu této práce bylo v podkapitole 1.9.1 uveden vliv sériového odporu na průběh V-A charakteristiky. Výsledky vynesené na obr. 22 nejsou zcela v souladu s teorií, jelikož posun průběhů charakteristik je vlevo oproti „referenční“ charakteristice LED_F_V_Average, namísto toho, aby byl posun vpravo dle teorie. Nad těmito výsledky je možné rozvést diskusi o možných faktorech, který by mohly být příčinou tohoto lehkého posunu. Pro přesnější pohled na věc by tedy bylo vhodnější měření zopakovat vícekrát nebo provést stejná měření i s jinými typy LED.



Obr. 22 Zprůměrované výsledné V-A charakteristiky zkoumaných LED

3.6 Příprava výbrusu a mikroskopické snímky

Třetí analýzou, která byla prováděna v rámci této práce byla aplikace metalografických výbrusů k následnému pozorování vlivu degradace na růst intermetalické vrstvy, která vzniká již při pájení kontaktů LED. Pro tuto analýzu byly připraveny dva výbrusy pro každý typ uložení LED modulu.

Tvorba metalografického výbrusu byla provedena stejně, jak je popsána v kapitola 2.: Pro přípravu těchto výbrusů byly využity dva LED čipy od každého typového krytí po dobu v klimatické komoře. Pro pozorování IMC vrstev bylo zvolena preparace za studena, aby nedošlo k dalším vlivům, které by mohly ovlivnit výsledky. Nejprve byly samotné LED čipy odděleny od modulu a vsazeny do nádoby pro zalití epoxidovou pryskyřicí, která byla připravena rozmícháním tvrdidla a pryskyřicového prášku ve vhodném poměru. Připravená tekutá epoxidová pryskyřice byla pomalu nalévána do nádoby se vsazeným vzorkem, aby co nejlépe přilnula ke vzorku a nevytvořily se velké vzduchové bubliny. Po vytvrzení zalévací hmoty se vzorky vyjmou z nádoby a nadchází proces broušení.

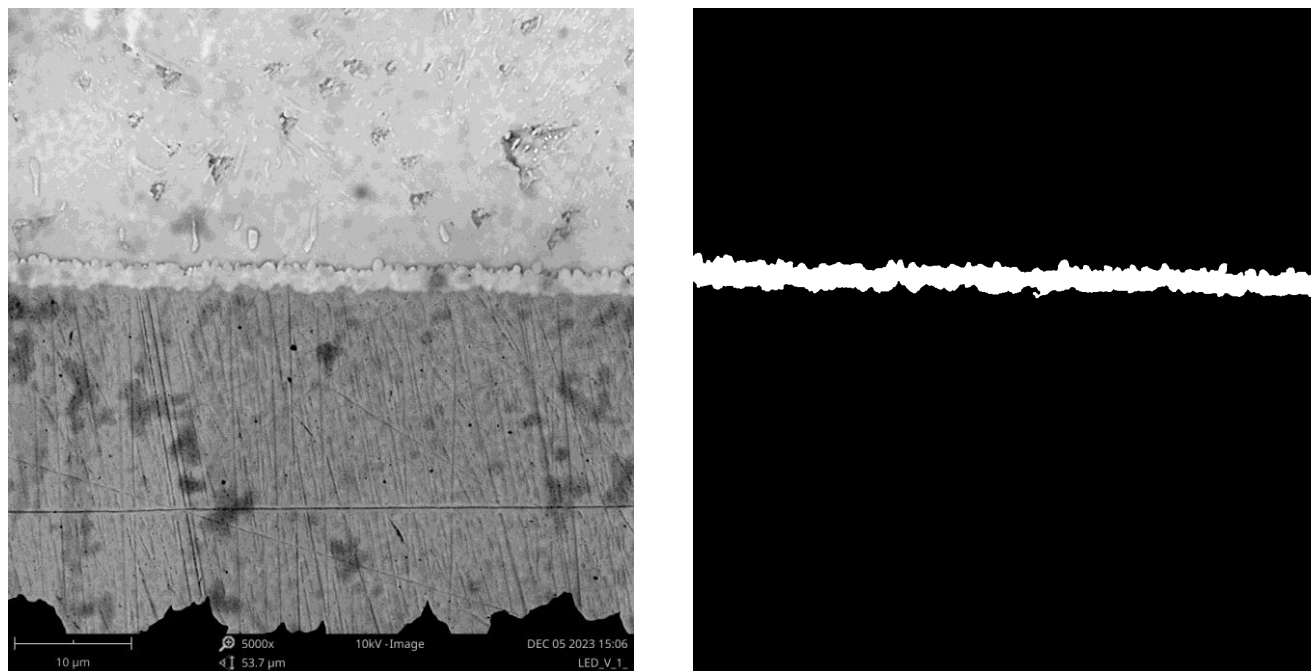
Broušení a leštění v této práci bylo prováděno na velmi podobné brusce jako na obr. 15. Pro naši aplikaci nebylo možné využít automatickou hlavu, jelikož je velmi obtížné ji správně nastavit pro nalezení velmi úzké části, která byla hledána. Každý vzorek byl připravován individuálně, ale využíván byl stejný postup snižování zrnitosti brusných papírů. Leštění bylo velmi podobné, ale s použitím jemnějších brusných kotoučů a suspenze s jemnými zrny. Mezi změnami hrubosti zrn byly vzorky čištěny v ultrazvukové čističce, aby byly odstraněny veškeré nečistoty usazené v pórech zalévací hmoty, které by mohly při dalším leštění vytvořit hluboké rýhy.



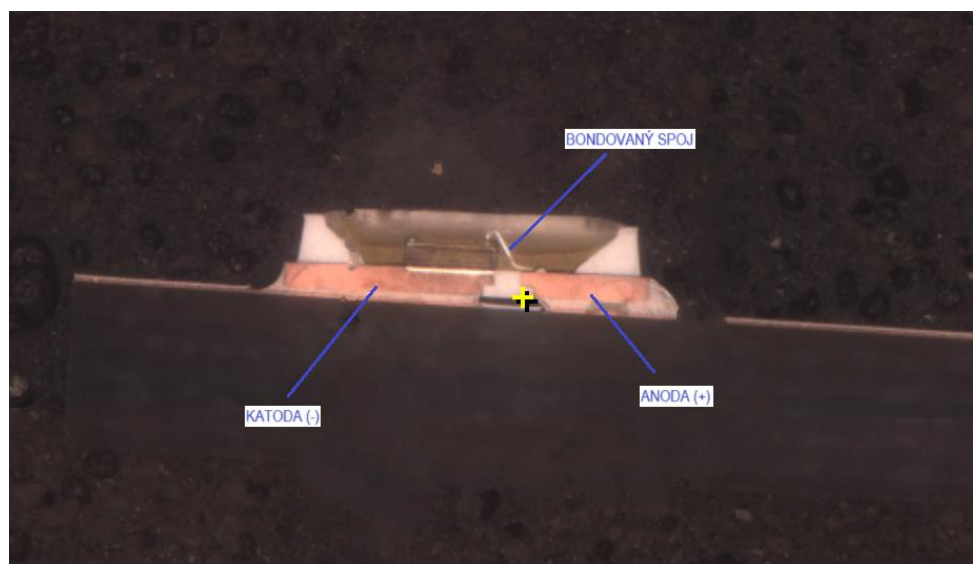
Obr. 23 Část vzorků připravených pro pozorování mikroskopem

Po vytvoření lesklé a homogenní hrany je možné pozorovat detailní snímky pomocí mikroskopů, které se liší principem a možnými aplikacemi. Pro pozorování IMC vrstvy je nutné použít kvalitní mikroskop. Proto elektronový mikroskop typu SEM (skenovací elektronový mikroskop) je ideální volbou, protože poskytuje vysoké rozlišení, přiblížení a kontrast. SEM funguje tak, že vysílá svazek elektronů na pozorovaný vzorek. Elektrony jsou odraženy od povrchu vzorku a zachyceny detektorem. Obraz je vytvořen srovnáním intenzity odražených elektronů s různých míst vzorku. IMC vrstva byla změřena na každé anodě a katodě každého vzorku. Pro snížení statistické chyby byly pořízeny 3 snímky na různých místech. Tedy z každého typu uložení LED modulu byly určeny alespoň 4 hodnoty tloušťky IMC vrstvy.

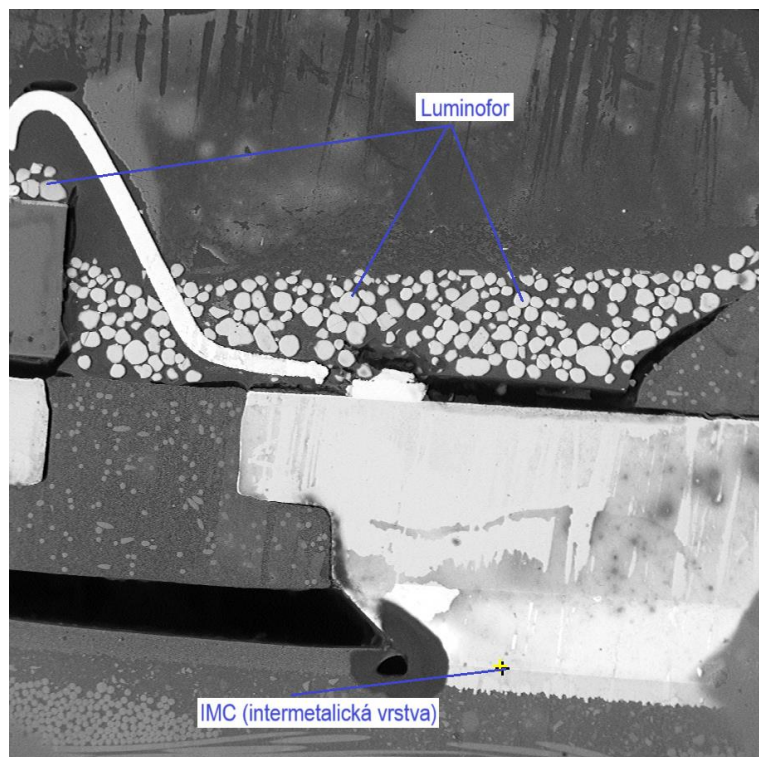
Z mikroskopických snímků se pomocí NIS elements vytyčily hranice IMC vrstvy. S touto hranicí se snímek přetransformuje do binární podoby, kde IML vyobrazuje bílá barva a okolí černě. Převod je klíčový pro následující kvantitativní analýzu ve výpočetní aplikaci, která byla provedena v programu Wolfram Mathematica. Pomocí funkcí a kalibrace měřítka snímku bylo provedeno měření tloušťky IMC vrstvy v několika místech bílé oblasti. Programem pak byl vypsán aritmetický průměr této vrstvy a zaznamenán.



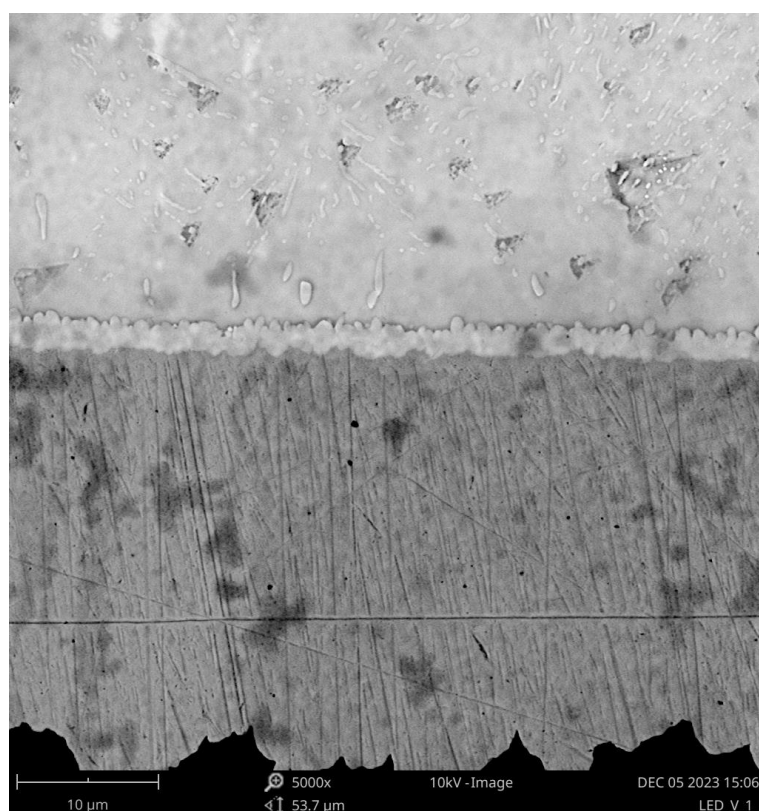
Obr. 24 Převod mikroskopického snímku do binární podoby



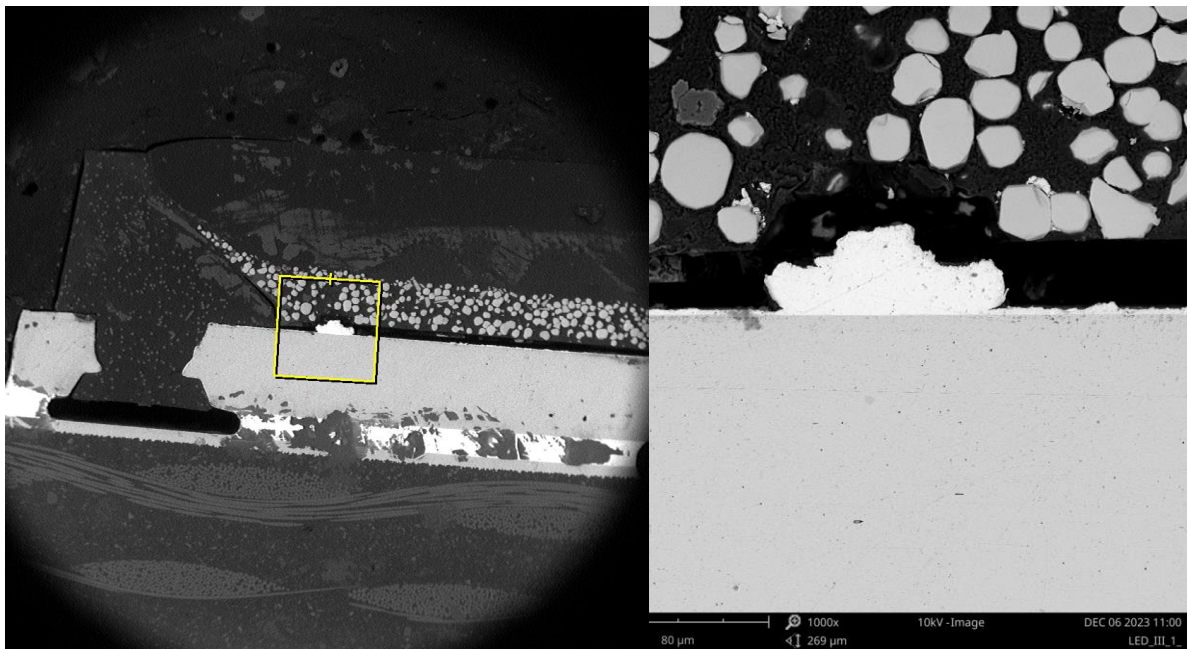
Obr. 25 Mikroskopický snímek řezu LED



Obr. 26 Detailní mikroskopický snímek anody LED s bondovaným spojem a IMC vrstvou



Obr. 27 Detailní snímek intermetalické vrstvy



Obr. 28 Detailní snímek bondovaného spoje

3.7 Výsledky IMC vrstvy

Analýza mikroskopických snímků připravených výbrusů byla zaměřena na hlubší pozorování vnitřní struktury, především pak na růst tloušťky intermetalické vrstvy vlivem zrychlené degradace.

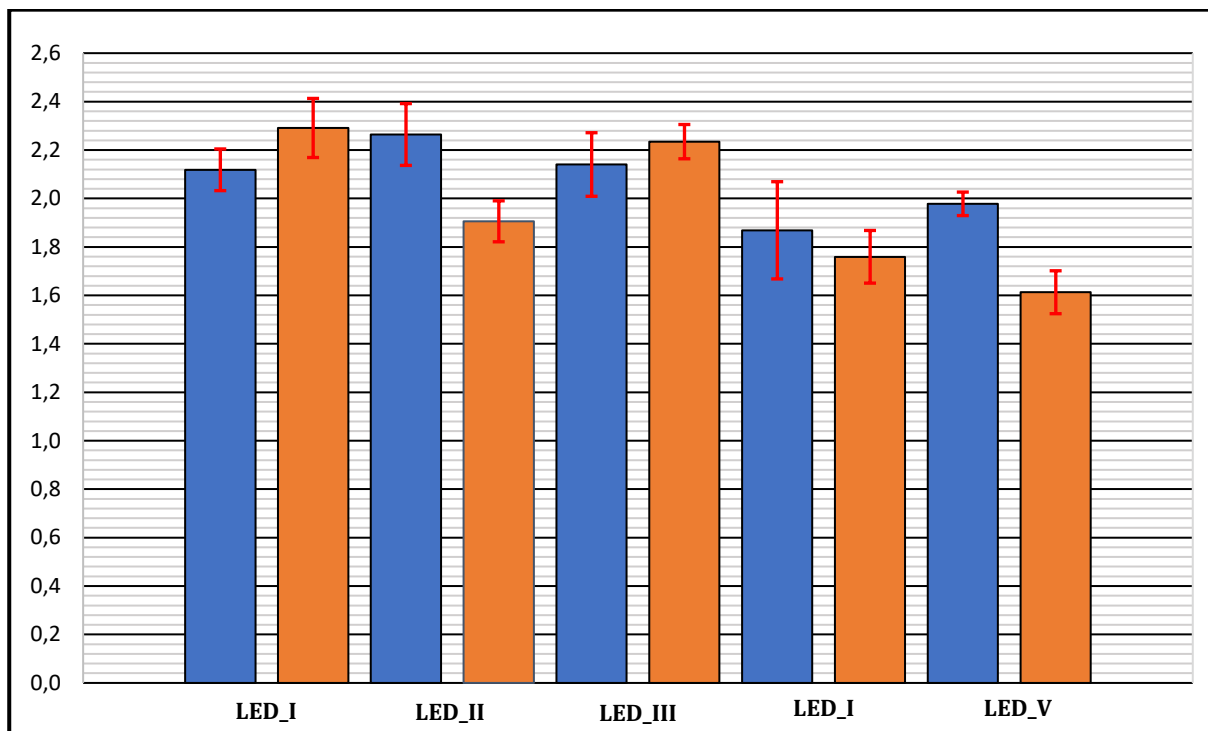
Na obr. 25 a obr. 26 lze pozorovat detailní snímky vnitřní struktury LED. V tomto případě jde o nedegradovaný vzorek s označením LED_V. Na obr. 27 je možné vidět intermetalickou vrstvu tohoto vzorku.

Vzorek	Průměrná hodnota na anodě [µm]	Průměrná hodnota na katodě [µm]	Směrodatná odchylka na anodě	Směrodatná odchylka na katodě
LED_I	2,12	2,29	0,172	0,244
LED_II	2,26	1,91	0,255	0,169
LED_III	2,14	2,23	0,262	0,141
LED_IV	1,87	1,76	0,401	0,218
LED_V	1,98	1,61	0,097	0,177

Tab. 3 Tabulka s průměrnými hodnotami IMC vrstvy

Na obr. 28 je detailní snímek konce bondovaného spoje připojující čip na katodu součástky, který má typický tvar. Nejen u tohoto vzorku (LED_III_1), ale i u ostatních nebyla zaznamenána žádná mezivrstva mezi kontaktem součástky a wirebonding materiálem. Možným důvodem je kvalitní materiál stříbrného či zlatého drátku, z kterého je spoj vytvořen.

Zpracování naměřených velikostí intermetalických vrstev bylo zprůměrováno do přehledné tab. 3 a také grafu, který je na obr. 29. Z těchto dat lze vyvodit následující závěry. Zrychlenou degradací vzrostla tloušťka IMC vrstvy na obou elektrodách, ale výrazněji k tomu v průměru došlo na katodě. Domnívám se, že by nárůst na katodě mohl být způsoben přiloženým napětím v klimatické komoře, při kterém dochází k větším rozdílům teplot mezi anodou a katodou, a tím i podpoření růstu intermetalické vrstvy. Nejvyšší nárůst IMC vrstvy na anodě byl naměřen na vzorku LED_II. Nejvyšší nárůst IMC vrstvy na katodě oproti „referenční“ (LED_V), byl na vzorcích LED_III, které reprezentují degradaci s volným vložením.



Obr. 29 Graf průměrných tloušťek IMC vrstvy

ZÁVĚR

V této práci bylo cílem se podrobně seznámit s technologií a strukturou LED provedením rešerše a prostřednictvím přípravy vzorků LED, které byly podrobeny navrženým testům a analýzám. Díky spolupráci s firmou Vyrtych a.s. bylo možné provést na jejich LED modulech nejen urychlenou degradaci v klimatické komoře, ale i využít jejich měřicí pracoviště světelných a elektrických veličin.

Mezi významné závěry z praktické části patří výsledky světelných testů, při kterých bylo objeveno značné zhoršení spektrálních vlastností LED, a tím snížení celkového zářivého toku. A to především u vzorků s označením LED_II neboli u vzorků krytých plastovým tělesem. Pokles je zde způsoben degradací luminoforu a krycí epoxidové pryskyřice, která změnila vyzařované spektrum LED, především v okolí vlnové délky $\lambda = 600$ nm.

Výsledky analýzy vnitřního pozorování struktury LED a vlivů degradace na její změnu ukázaly na zvětšení tloušťky intermetalické vrstvy na kontaktech LED. Tento nárůst byl způsoben především vlivem velkých teplotních výkyvů při cyklickém klimatickém a elektrickém namáhání.

Naopak z měření V-A charakteristik nebyla zjištěna velká změna vlivem provedené degradace. Výsledné charakteristiky všech vzorků mají podobné průběhy, avšak je zde viditelný jejich lehký posun oproti charakteristice referenční. To není v souladu s teoretickými předpoklady. Dle očekávání mělo dojít k růstu sériového odporu, z důvodu nárůstu intermetalické vrstvy na kontaktech diody, tedy k posunu vpravo oproti referenční charakteristice. Možnými faktory pro posun průběhů vlevo je možné snížení sériového odporu, tedy zlepšení elektrických vlastností LED. Dalším možným faktorem je individualita referenčního modulu, který byl vybrán pro měření. Je totiž možné, že elektrické vlastnosti referenčního modulu mohly být v rámci odchylky, udávané výrobcem horší, než by tomu tak mohlo být u jiného nedegradovaného LED modulu. Pro ověření či vyvrácení správnosti těchto odchylek ve V-A charakteristice, by bylo potřeba měření zopakovat vícekrát, či provést stejná měření i s jinými typy LED, a tak získat širší přehled nad danou problematikou.

Všechny tyto analýzy potvrdily vliv krytí LED modulu na jejich degradaci. Využitím těchto znalostí při návrhu osvětlení, lze prodloužit životnost a zvýšit spolehlivost navrženého osvětlení pro dané prostředí aplikace.

V této práci bylo využíváno průměrování výsledků pro lepší přehlednost a jejich snazší interpretaci. Proto mohou být výsledky lehce zkreslené a nepřesné, ale pro vzájemné porovnání typů krytí LED je přesnost dostačující. Je důležité podotknout, že bylo pracováno s konkrétními LED moduly, a tak výsledky nelze obecně aplikovat na všechny typy LED čipů.

Dalším důvodem k pozorování LED a degradace jejich struktur, by mohly být například materiálové změny nebo vliv klimatických, elektrických či jiných zkoušek.

LITERATURA

- [1] AILIOAIE, Laura Marinela a LITSCHER, Gerhard. *Molecular and Cellular Mechanisms of Arthritis in Children and Adults: New Perspectives on Applied Photobiomodulation*. Online. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020, roč. 21, č. 18. ISSN 1422-0067. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijms21186565>.
- [2] P. Doležal, "Příčiny poruch a selhání LED při provozu," Bakalářská práce, Ústav elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, Brno, Česká republika, 2015.
- [3] T. Pavelka, "Provozní vlastnosti LED a jejich modelování," Ph.D. disertace, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno, Česká republika, 2016
- [4] OpenStax. *Light-emitting diodes*. In *Materials science* (Supplemental modules). LibreTexts., 2023 Dostupné z [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_\(Materials_Science\)/Semiconductors/Light_Emitting_Diodes](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Semiconductors/Light_Emitting_Diodes)
- [5] V. Dvořáček, *Světelné zdroje světelné diody*, Světlo, roč. 2009, č. 5. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39810.pdf>
- [6] P. Žák a J. Habel, *Terminologie LED světelných zdrojů*, Světlo, roč. 2017, č. 3, str. 24. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/terminologie-led-svetelných-zdroju--2435>
- [7] *Co jsou LED diody „COB“ a proč jsou důležité?* Online. In: Oehling. Dostupné z: <https://www.oehling.cz/advisor/co-jsou-led-diody-cob-a-proc-jsou-dulezite> [cit. 2023-12-26].
- [8] KODYTEK, Tomáš. *SPEKTRÁLNÍ PROSTOROVÉ CHARAKTERISTIKY MODERNÍCH LED SVÍTIDEL*. Diplomová práce. Praha: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta elektrotechnická, 2019. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82849/F3-DP-2019-Kodytek-Tomas-SPEKTRALNI%20PROSTOROVE%20CHARAKTERISTIKY%20MODERNICH%20LED%20SVITIDEL.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [9] Aquarium Store Depot, *Planted Aquarium*, Aquarium Store Depot, vydáno 20. července 2023. [Online]. Dostupné z: <https://aquariumstoredepot.com/blogs/news/planted-aquarium>
- [10] Z. Čerovský a J. Pavelka, *Výkonová elektronika*, ČVUT - České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2000, Dostupné z: <http://cvut.falconis.cz/semestr-4/ve1/vykonova-elektronika-Cerovsky-Pavelka.pdf>
- [11] L. Černá, *Fotometrie*, Fakulta elektrotechnická Českého vysokého učení technického v Praze. [Online]. Dostupné z: <http://pasan.feld.cvut.cz/dokumenty/fotometrie.pdf>
- [12] J. Škoda, P. Baxant, *Závislost indexu podání barev na kombinaci různých světelných zdrojů*, Světlo, č. 4/2018, str. 44, VUT Brno dne 11. září 2018. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/zavislost-indexu-podani-barev-na-kombinaci-ruznych-svetelných-zdroju--3132>
- [13] SINGH, Preetpal a TAN, Cher Ming. *Degradation Physics of High Power LEDs in Outdoor Environment and the Role of Phosphor in the degradation process*. Online. *Scientific Reports*. 2016, roč. 6, č. 1. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/srep24052>. [cit. 2024-01-04]
- [14] S.-C. Yang, P. Lin, C.-P. Wang, S. B. Huang, C.-L. Chen, P.-F. Chiang, A.-T. Lee, M.-T. Chu, *Failure and degradation mechanisms of high-power white light emitting diodes*, *Microelectronics Reliability*, vol. 50, no. 7, 2010. ISSN 0026-2714 Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2010.03.007>
- [15] FUMAGALLI, Kim, Roberto FARANDA, Lorenzo FARNE, W. L. TSAI a T. J. CHEN. *Analysis of possible LED failure mode*. 2014 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe. IEEE, 2014, s. 1-8. DOI: 10.1109/PCICEurope.2014.6900068.

- [16] P. Příbek, *Intermetalické sloučeniny bezolovnatých pájecích slitin*, Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2022. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/48019/1/DP_Pribek_Petr.pdf
- [17] N. JAAFAR, Norhanani Binte a CHING, Eva Wai Leong. *Comparison of Au/Al, Cu/Al and Ag/Al in wirebonding assembly and IMC growth behavior*. Online. In: *2016 IEEE 18th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*. IEEE, 2016, s. 10-12. ISBN 978-1-5090-4369-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/EPTC.2016.7861432>. [cit. 5.1.2024].
- [18] M. Bránecký, *Návrh a realizace úprav zařízení pro metalografické výbrusy*, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2013. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=69333
- [19] L. Michnová, *Úvod do metalografie*, Metodická příručka, Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i., Praha, 2015. ISBN: 978-80-86302-71-3. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6568795-Uvod-do-metalografie.html>
- [20] Inovace oboru Mechatronik pro Zlínský kraj. (2015). *Metalografie - příprava vzorku pro pozorování mikroskopem*. Metodická příručka, Registrační číslo:CZ.1.07/1.1.08/03.0009. Dostupné z: <https://docplayer.cz/43749171-Metalografie-priprava-vzorku-pro-pozorovani-mikroskopem.html>
- [21] Palkoska, J. (2013). *Metalografické výbrusy materiálů a struktur v elektronice*. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/7466/1/DP_Jan_Palkoska.pdf
- [22] Kemet, *Forcipol Grinding and Polishing Machines*, [Online]. Dostupné z: <https://www.example.com>, 2023. [Cit. 5. ledna 2023].
- [23] Meneghini, M., Dal Lago, M., Trivellin, N., Meneghesso, G., & Zanoni, E. (2014). Degradation Mechanisms of High-Power LEDs for Lighting Applications: An Overview. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(1), 78–85. doi:10.1109/tia.2013.2268049
- [24] ČEZ "FOTOVOLTAIKA - Polovodiče". Dostupné na: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k31.htm> (cit. 26. 4. 2024).
- [25] J. Sedláček, "Kontaktování - wirebonding", prezentováno na ČVUT FEL v předmětu SPE – Svařování a pájení v elektrotechnice, 2023/2024.
- [26] NISHIKAWA, Hiroshi a IWATA, Noriya. Formation and growth of intermetallic compound layers at the interface during laser soldering using Sn–Ag Cu solder on a Cu Pad. Online. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, roč. 215, s. 6-11. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.08.007>. [cit. 2024-05-19]