

Záró beszámoló az NKFIH K_128315 sz. “LED öregedés új vizsgálati módszerei” című kutatási projektjéről

Témavezető:

Dr. Poppe András tanszékvezető egyetemi tanár, az MTA doktora (BME VIK Elektronikus Eszközök Tanszéke)

A projekt időtartama:

2018.09.01-2023.03.31 (3 év + COVID vészhelyzet miatti hosszabbítás)

Tartalomjegyzék

A kutatási eredmények összefoglalója	2
A projekt előzményei, célkitűzései	2
Az elért eredmények áttekintése	4
A projekt eredmények hasznosíthatósága	5
Eltérések a szerződéstől	5
A kutatási eredmények részletei	6
Egyéb eredmények.....	20
Hivatkozások	21
A projekthez kapcsolódó publikációk.....	23
Folyóirat cikkek.....	23
Konferenciaközlemények	24
Disszertációk	25
Könyvek, könyvrészletek	25
Egyéb eredmények referenciái.....	25

A kutatási eredmények összefoglalója

A projekt előzményei, célkitűzései

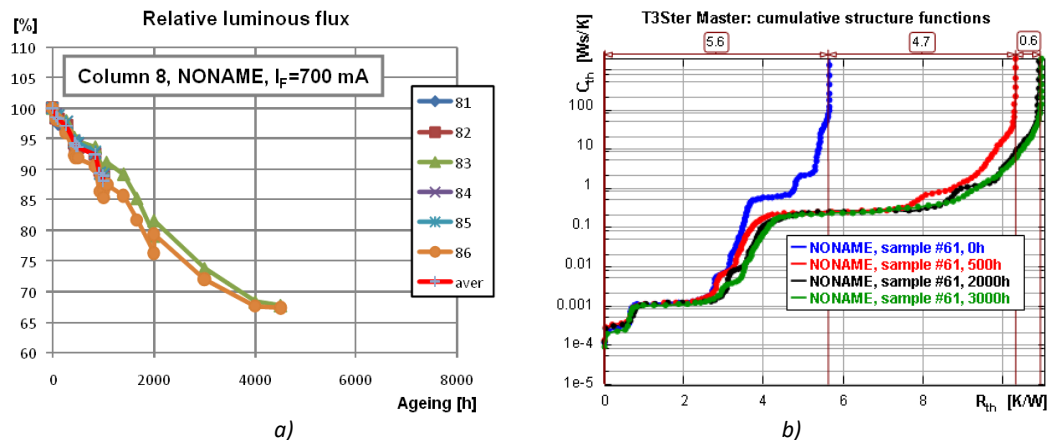
Jelen kutatási projektünk fő célkitűzése a LED tokok és LED-es világítótestek fizikai megvalósításának újszerű vizsgálata a megbízhatóság / élettartam, mint egy LED-es termék egyik legfontosabb minőségi paramétere szempontjából. Az ilyen termékek jó minősége fontos jellemzője az európai világítástechnikai iparnak, különösen az ázsiai versenytársakkal való összehasonlításban. E jó minőségnek a *terméktervezés folyamatán* keresztüli biztosítása volt a 2020-ban lezárult Delphi4LED H2020 ECSEL projektnek [1], [2], [3]. A tervezési folyamat megújításának (teljes számítógépesítésének) legfontosabb aspektusa a LED-ek erősen hőmérsékletfüggő, ún. multi-domain viselkedésének alkalmas, ún. Kompakt modellekkel való leírása volt. Ezen modellek paramétereit a legújabb LED termikus és optikai tesztelési szabványokon alapuló mérések [4], [5], [6], [7] adatai alapján állapítjuk meg. A Delphi4LED project alapkonceptiója az volt, hogy egy lapka szintű multi-domain LED modell [8], [9], [10] a fizikai LED tok ún. termikus kompakt modelljével [11] valamint a tok tágabb termikus környezetének a modelljével alkalmas a LED alkalmazások / LED-es lámpatestek üzemi fényáramának (*hot lumens*) pontos számítására [12], [13]. Ilyen modellek alkalmazásával egy LED-es világítótest hűtési megoldásai azok fizikai prototípusain végzett mérések helyett számítógépes szimulációk sorozatával tanulmányozhatóak úgy, hogy még az adott hűtési megoldás mellett tapasztalható üzemi fényáramot is megkapjuk, lehetővé téve annak eldöntését, hogy egy adott tervvariáns megfelel-e a specifikációknak. Ezen kívül, az ilyen multi-domain szimulációk sorozatával összetett vezérlési sémák is kialakíthatóak, mint pl. közvilágítási lámpatestek hőmérséklet-kompenzált konstans fényáramtartásra vezérlése [16], [17], [18].

A Delphi4LED projekt egyik fő hiányossága az volt, hogy a számítógépesített tervezési munkafolyamatban alkalmazott modellek kizárólag a "friss", 0 órás gyári új LED-ekre vonatkoznak, semmi információt nem tartalmaznak arról, hogy egy adott üzemidő eltelte után hogy viselkednek a LED-ek. Ugyanakkor a Delphi4LED projekt keretében végzett nemzetközi körmérés során (amelynek vezető laboratóriuma Tanszékünk termikus és megbízhatóság laborja volt) [19], [20] kiderült, hogy egy 500 órás kezdeti beégetési periódus ellenére a körmérés során folyamatosan halványult a vizsgált LED-ek fénye. *Ez felvetette azt a kérdést, hogy miképpen modellezhető a LED-ek fényáramtartása és hogy egy ilyen modell miképpen illeszthető a meglévő multi-domain LED modellhez.* Egy korábbi publikációban [21] ezt részben már áttekintettük, egy fehér LED-ekkel végzett kb. 10000 órás LM-80 szabvány [22] szerinti öregítési kísérlet (amelyet korábban a NANOTHERM EU FW7 projekt [23] keretén belül végeztünk) eredményeit felhasználva, egy hőmérséklet és öregedés kompenzált konstans fényáramtartási séma kialakítását megcélozva.

A szilárdtest világítástechnikai iparban világszerte az IES LM-80 szabvány [22] öregítési körülményeket használják a LED-ek élettartam tesztjei során. Ezek értelmében konstans DC árammal kell a vizsgált LED-eket táplálni, magas környezeti hőmérséklet (tipikusan 85 °C) mellett. A vizsgált öregedés indikátor a LED-ek ún. fényáramtartása (*lumen maintenance*, pontosabban: a kibocsájtott teljes fényáram csökkenése). Élettartam becslésekhez legalább 6000 órányi öregítés szükséges, az iparban gyakran 10000 órán át is öregítik a LED-eket. Adott élettartam kritérium (pl. a kezdeti fényáram 70%-ára csökkent fényáram) vonatkozásában az IES TM-21 dokumentum [24] ajánlása szerinti extrapolációval történik az élettartambecslés. Hangsúlyozandó, hogy a LED élettartamvizsgálatok kvázi valós idejű mérések (az LM-80 szerinti öregítés során nem alkalmaznak gyorsító tényezőket), valamint a konstans DC árammal történő

táplálás és a 85 °C-os konstans környezeti hőmérséklet a valós üzemi körülményeket csak hozzávetőlegesen közelítik.

A már említett élettartam és hőmérséklet kompenzált konstans fényáramtartást eredményező vezérlés kialakításához olyan modell szükséges, amely a valós üzemi körülmények változásának (az ún. *mission profile*) a hatását is képes leírni. Ezért a fényáramtartás, mint öregedés indikátor mellett egyéb öregedés indikátorok vizsgálata és modellezése is fontos. Ilyen pl. a tok struktúra degradációja, amelyet egy korai LED öregítési kísérlet során már figyelemmel kísértünk [25] (1. ábra), ahol tehát az öregítési folyamat során végzett in-situ termikus tranziens mérésekből származó struktúra függvények is öregedés indikátorok (1b. ábra).



1. ábra: LED öregedés megfigyelése: a) a fényáramtartási karakterisztikán, illetve b) a hővezetési utat jellemző struktúra függvény változásain keresztül [25].

A projekt fő célkitűzései és munka-hipotézisei a következők voltak:

Alapvető célunk a LED öregedés mélyebb megértése és pusztán fényáramtartási karakterisztikákon túlmutató öregedési indikátorok vizsgálata, ezek változásának modellezése volt, lehetőség szerint Spice áramkör-szimulációs programokban használható ún. multi-domain modellek formájában annak érdekében, hogy a LED-es terméktervezés folyamata során a tervezők a várható LED élettartam tetszőleges pillanatában képet kaphassanak egy lámpatest működéséről, hátralévő várható élettartamáról. Ezzel kapcsolatban az alábbi feltételezéseink voltak:

- A konstans nyitóáram és állandó környezeti hőmérséklet, mint standard öregítési körülmények (lásd: [22]) alkalmasan választott teljesítmény, hőmérséklet és páratartalom profilokkal kiegyezíthetők úgy, hogy a LED-es lámpatestek valós üzemi körülményeit jobban közelítsük.
- Feltételezzük, hogy a termikusan asszisztált hibamódok mellett ezen addicionális kondíciók olyan hibamódokat is aktiválnak, amelyekre a standard LM-80-as öregítési feltételek nem hatnak.
- Feltételeztük, hogy az ilyen hibamódokhoz eddig nem használt öregedés indikátorok is társíthatók és amelyek változása a ma szokásos LED karakterizáló műszerekkel nyomon követhető (pl. izotermikusan mért IVL karakterisztikák, termikus impedancia görbék, spektrumok).
- Korábban már bizonyítást nyert, hogy a mért termikus impedancia görbékből meghatározott struktúra függvények a LED tokokon belüli termikus határfelületek alkalmas öregedés indikátorai (lásd: [25], és [14] 4. fejezetét).
- Feltételeztük, hogy egy Spice-kompatibilis LED multi-domain LED modell [8], [9], [10] paraméterei, mint pl. a szaturációs áram, az idealitási tényező vagy a soros ellenállás értékei szintén alkalmas öregedés indikátorok, amelyek különböző hibamódokhoz rendelhetők.

- Feltételezzük, hogy alkalmasan tervezett mérések révén elég információ nyerhető ahhoz, hogy a modellparaméterek időbeli változása leírható legyen és legalább egy LED lapka szintű multi-domain Spice modellben ez implementálható.
- A LED-ek spektruma a félvezető anyag sávszerkezetének is függvénye és az egyes spektrumok jól modellezhetők [30] és e modellek paraméterváltozásai szintén alkalmasak LED élettartam becslésre [31].

Az elért eredmények áttekintése

A projekt időtartama alatt a következő műszaki-tudományos eredményeket értük el:

- Kialakítottunk egy olyan lapka szintű Spice jellegű multi-domain LED modellt, amely egy ipari tervezői munkafolyamatba jól illeszthető [J1]. A szokásos feszültség vezérelt szemléletű elvi modellt a gyakorlatban áram vezérelt szemléletű modell formájában valósítottuk meg, amely mind egyenlet szintű, mind áramköri makro implementációban jó konvergencia tulajdonságokkal rendelkezik, így jól használható akár egy áramkörszimulációs környezetben [J1], akár komplex 3D struktúrába ágyazott LED lapkák numerikus szimulációjához illesztve [J2], [C3], [C4].
- A fenti modell gyakorlati megvalósításában alkalmazott hőmérséklet vezérelt feszültség generátorok karakterisztikái egy pontosított LED mérési eljárásból származnak (ún. K-faktor függvények) [D2]. E pontosított LED mérési eljárás (újfajta K-faktor kalibráció) a JEDEC LED termikus mérési szabványa 2022-ben publikált új kiadásában szereplő ajánlás alapját képezi. A pontosított mérési eljárást egy, a Springer kiadónál megjelent könyv [B2] egyik fejezetében is részletesen ismertettük [B3].
- Igazoltuk azon hipotézisünket, hogy a LED-ek lapka szintű, Spice-jellegű multi-domain modelljének paraméterei is öregedés indikátornak tekinthetők. Ezek az öregítési idő monoton függvényei, amelyeknek időbeli változásai analitikus függvényekkel jól közelíthetők [J3], [C1], [C2]. A modell alkalmas a standard öregítési körülmények közt mérhető fényáramtartási görbék pontos leírására.
- A fenti, [J3] cikk szerinti modellel leírt nominális öregedés alapján javasoltuk a "lifetime budget" fogalmának bevezetését [D1], amely egy LED tényleges működési profilja szerinti várható élettartam becslésének alapja. (A tényleges nyitóáram és hőmérséklet szerinti gyorsítási tényezők megállapítására vonatkozó tesztek a projekt zárásakor még nem fejeződtek be.)
- Azon feltételezésünket, hogy egy pulzus-szélesség modulációt (PWM) használó fényáramszabályzással rendelkező LED esetében a LED tok fizikai struktúrájának öregedése függ a modulációs frekvenciától, az erre a célra tervezett és végrehajtott mérések igazolták [J4], [C8]. Az 1 kHz alatti PWM frekvenciák esetében a lapka rögzítő réteg delaminációjára utaltak a struktúra függvények változásai. Az így vizsgált minták esetében a 313 Hz környéki dimmelési frekvenciánál tapasztaltuk a legnagyobb hatást. Azt találtuk, hogy 10 kHz feletti PWM frekvenciáknak már nincs szignifikáns hatás a LED tok fizikai degradációjára [J4], [C8].
- Dr. Harsányi Gábor professzor kutató csoportjával együttműködve HAST vizsgálatokkal igazoltuk, hogy a relataív páratartalom számos hibamechanizmuson keresztül jelentősen gyorsítja a LED-ek öregedését [C10]. Ezen vizsgálatok jelenleg is folyamatban vannak, a vonatkozó hibamechanizmusok feltárása és modellezése jelenleg is zajlik.
- Egy új mérési eljárás koncepcióját dolgoztuk ki, amellyel a LED tokok kombinált termikus és radiometriai/fotometriai karakterizálása kb. 1 nagyságrenddel gyorsítható [C5], [C6], [C7]. Az eljárás gyakorlati megvalósítása jelenleg is folyamatban van.
- Egy webes felhasználói felülettel rendelkező, új paraméter identifikációs eljárást dolgoztunk ki [E1] a [J1]-ben publikált új multi-domain LED modellünkhöz illeszkedően. Ez az eljárás már nem igényli, hogy a LED karakterisztikákat előre meghatározott pn-átmenet hőmérsékletek mellett mérjék, ezzel is gyorsítva a modellezéshez szükséges LED karakterizáló eljárást (lásd az előző pontot).
- Javaslatot tettünk LED tokok termikus kompakt modelljei öregedés függő elemeinek struktúra függvényekből történő automatikus identifikációs módszerére [C7].

Záró beszámoló az NKFIH K_128315 sz. "LED öregedés új vizsgálati módszerei" című kutatási projektjéről

- Módszert dolgoztunk ki kék LED lapkát, illetve kék LED lapkát és fényport tartalmazó LED fényforrás párok spektrális teljesítményeloszlásának pontos kísérleti tanulmányozására (kontrollált tulajdonságú, saját egyedi LED minták készítése) [J2], [C3], [C4], amelyek lehetővé teszik hogy egy fehér LED spektrumát szétválasszuk a kék primer sugárzás, és a fényport által ebből konvertált, nagyobb hullámhosszúságú szekunder sugárzás spektrumára [C11]. Ez lehetővé teszi a monokromatikus (kék mellett pl. a vörös és zöld LED-ek) spektrumának és a konvertált fény spektrumának külön-külön történő modellezését [C11].
- Meghatároztuk és modelleztük a spektrumok lapkahőmérséklet és nyitóáram függését is. Különböző pontossági metrikákat fogalmaztunk meg a spektrum modellek jóságának vizsgálatára [J5], [C11], [E6], amelyek segítségével számos, az irodalomban publikált spektrum modell, valamint általunk javasolt, harmadfokú polinomillesztésen alapuló modell munkapontfüggést leíró modell pontosságát tekintettük át. E saját modell az *irodalomban Split Pearson VII* néven ismert modellel kombinálva nagyon pontosnak mutatkozott ezen metrikák szerint. Öregített spektrumok vizsgálatára jelen projekt tartama alatt már nem került sor. E vizsgálatokat az AI-TWILIGHT H2020 ECSEL projekt keretén belül folytatjuk.

A projek eredményeit **4 db impakt faktoros folyóirat cikk** ([J1]-[J4]), **1 lektorált magyar folyóirat cikk** [J5], **12 db nemzetközi konferenciaközlemény** ([C1]-[C12]), **2 db PhD disszertáció** (Hegedüs János, Hantos Gusztáv - [D1], [D2]), dokumentálta. Ezekon kívül a projekthez egy könyv [B2] és két könyvrészlet [B1], [B3], 2 felkért előadás [E2], [E5], **egy tudományos ismeretterjesztő cikk** [E4], egy PhD pályázati díj [E3] és egy BME VIK kari **2. helyezett TDK dolgozat** [E6] is kapcsolódik. **A projekt eredményeként a Padovai Egyetem M. Meneghini professzor vezette kutatócsoportjával alakult ki szoros együttműködésünk.**

A projekt eredmények hasznosíthatósága

A projekt alapötletei és kezdeti eredményei vezetettek el az **AI-TWILIGHT H2020 ECSEL projekt** kidolgozásához, amelyben kulcselem a LED-ek öregedésének modellezése mind a tervezési folyamat számára, mind egyes lámpatest fajták **működés közben használt digitális ikrei segítségével történő prediktív karbantartási sémák kialakítása számára**. Ennek kulcs eleme az aktuális **működési profiltól függő várható maradó élettartam becslése**, amelyben reményeink szerint az általunk javasolt modell [J3] jól használható lesz.

A fent említett digitális ikreken túl **ipari relevanciával bír** az általunk kidolgozott **új modellparaméter identifikációs eljárás és annak az interneten elérhető implementációja** [E1], valamint az általunk javasolt új, a korábbinál kb. **1 nagyságrenddel gyorsabb multi-domain LED karakterizáló eljárás** [C5]-[C7]. Előbbi egy üzleti alapon értékesíthető új szolgáltatás kialakítását teszi lehetővé, míg utóbbi, szemléletében illeszkedve a CIE TC2-91 műszaki bizottsága [33] által kidolgozandó új LED mérési szabványhoz, a ma szokásos LED karakterizáló műszerek új, felxibilis vezérlő szoftverének a kifejlesztését teszi lehetővé. Ennek értékesítése a CIE TC2-91 bizottság által létrehozandó új mérési szabvány publikálása után válik reális piaci lehetőséggé.

Eltérések a szerződéstől

A COVID-19 helyzet miatti (elsősorban a BME-n 2020.03.10-től bevezetett) korlátozások következtében a laboratóriumi mérések jelentős késedelmet szenvedtek, a 2020.-ra és 2021.-re tervezett nemzetközi konferencia részvételek elmaradtak. Az első nemzetközi konferencia, amelyen már fizikailag is részt tudtunk venni, a 2022. évi, Dublinban megrendezett THERMINIC Workshop volt.

A 3 évre tervezett projektünk végül – a költségvetés lényeges módosítása nélkül – 1,5 év COVID vészhelyzet miatti hosszabbítást követően, 2023.03.31-ével zárult.

A projektben a tervezett munkatársak vettek részt, akik a projekthez kapcsolódó tudományos eredményeik révén PhD fokozatot szereztek.

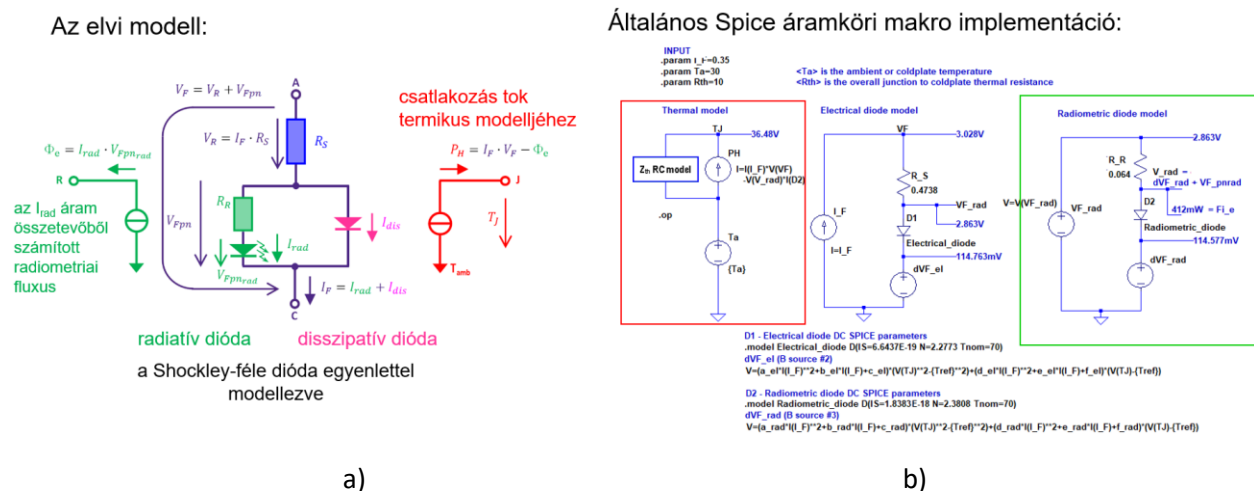
A projekt terhére egyetemi hallgatók foglalkoztatását terveztük. Erre csak a COVID járvány elmúltával nyílt módunk, ezért a hallgatók számára csak a COVID időszak után történt személyi kifizetés.

A projekt tudományos célkitűzései tekintetében nem volt lényeges eltérés a munkatervtől, de a tervezett egyes mérések részletei kisebb-nagyobb mértékben eltértek a tervezettektől, pl. parciális fluxus mérő cső helyett minden optikai mérést integráló gömbben végeztünk, aminek révén bizonyos kalibrációs problémákat elkerültünk. Az optikai méréseket klasszikus módon (JEDEC JESD 51-51/51-52 [4], [5], valamint CIE 127:200/225:2017 előírásoknak [6], [7] megfelelően), állandósult állapotban terveztük, aminek azonban nagy az időigénye. Ennek lerövidítése érdekében új mérési protokoll kidolgozásába kezdtünk, összhangban a CIE TC2-91-es műszaki bizottság megközelítésével, amelynek az a lényege, hogy az optikai méréseket rövid impulzus sorozatokkal végezzük, a termikus mérésektől időben elválasztva. Ennek révén több LED tok termikus mérését párhuzamosan is elvégezhetjük, ezzel gyorsítva egy LED populáció teljes karakterizálását.

A projekt célkitűzései közt szerepelt a LED spektrumok, mint lehetséges öregedés indikátorok vizsgálata, ill. modellezése. Ezt a munkát csak a projekt utolsó időszakában tudtuk elkezdni, ezért öregített spektrumok vizsgálatára már nem került sor. E munkát az AI-TWILIGHT projekt keretén belül nemzetközi együttműködésben folytatjuk.

A kutatási eredmények részletei

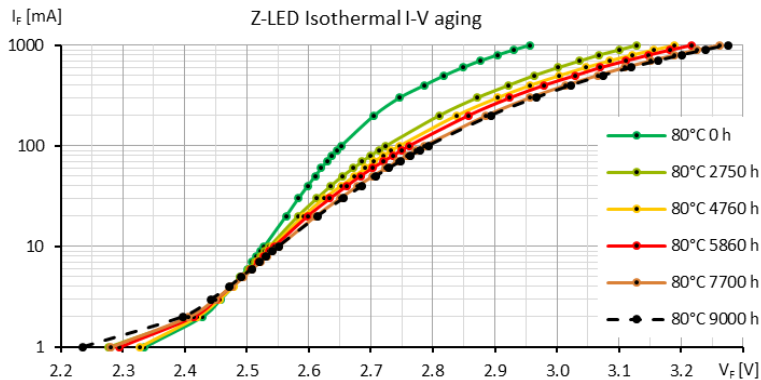
A munka kezdeteként, az első projekt évben, az akkor záruló Delphi4LED H2020 ECSEL projekthez is kapcsolódva [1], **megújítottuk azt a LED lapka szintű multi-domain LED modellt (2. ábra), amely modell paramétereit jó jelöltnek tarjuk a LED öregedés új indikátoraiként.** E munkáról egy open access folyóirat cikkben számoltunk be [J1].



2. ábra: A megújított multi-domain LED modell: a) a modell elvi sémája, és b) gyakorlati megvalósítása Spice áramköri makro formában (LT Spice sémában prezentálva)

A modellhez illeszkedően elkészült egy paraméteridentifikáló Excel alkalmazás, (amelyet később egy továbbfejlesztett algoritmussal működő webes alkalmazás [E1] született, amelyet az AI-TWILIGHT

projektpartnerek is használnak). Ezt felhasználva korábbi, LM80 kondíciók szerinti öregítési vizsgálatok során mért és archivált izotermikus IVL karakterisztikákból származó, több mint 5000 órás öregítés alatt 5 időpontban mért adatokból is meghatároztuk a mért LED-ek multi-domain modellparamétereit. Az így nyert adatsorok igazolták hipotézisünket: **a modellparaméterek valóban monoton függvényei az öregítési időnek.** E kezdeti adatokból az látszik, hogy az 1000 és 2000 órás öregítés közben drasztikus változás zajlik, majd ezt követően egy lassabb, kisebb meredekségű változás látszik. E vizsgálatainkról a CIE (Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság) 4 évente megrendezésre kerülő nagy konferenciáján számoltunk be 2019. júniusában, az USA-ban, Washingtonban. E konferencia közleményünk szabad hozzáférésű [C1].



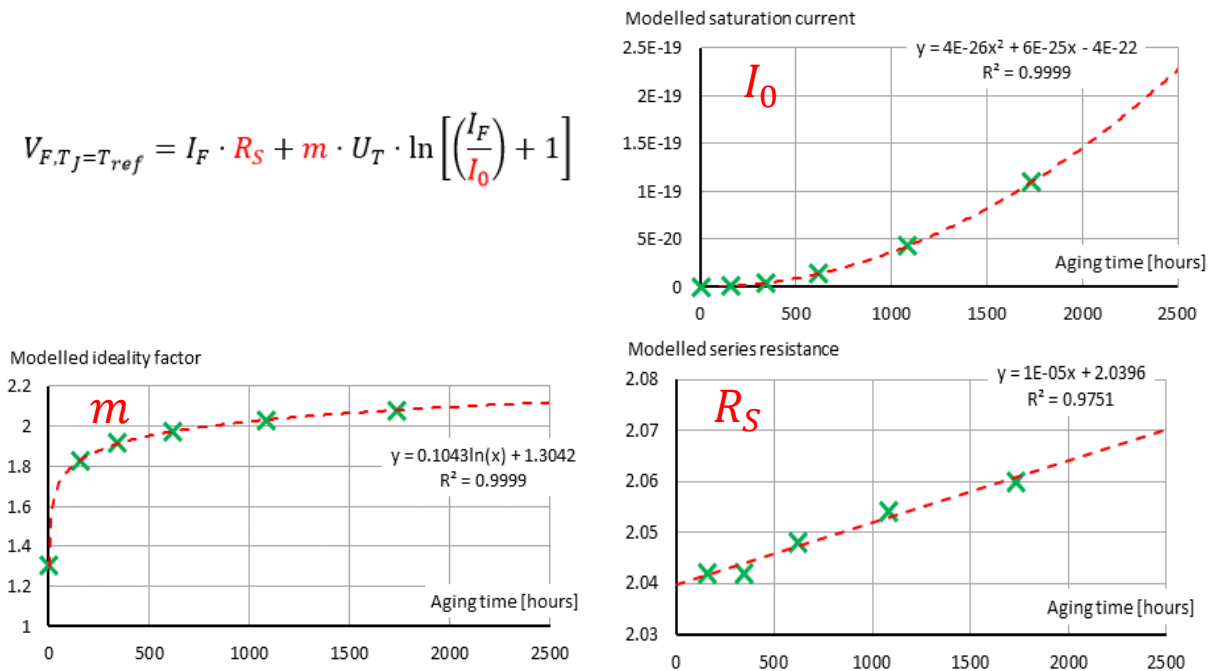
3. ábra: LM-80 szabvány [22] szerint öregített LED-ek elektromos karakterisztikái.

A standard LM80-as öregítés egy adott öregítési idő elteltét (tipikusan 10000 óra) írja elő. Tapasztalatunk az, hogy - legalábbis modellezési szempontból - célszerűbb az öregítést addig végezni, amíg a fényműködés adott értékű nem lesz. Közepes teljesítményű LED-eket öregítettünk e kísérletben (3. ábra). E kísérletsorozatban megállapított multi-domain modellparaméterek esetében már határozottabb trendek figyelhetők meg, ezért **javaslatokat fogalmaztunk meg az egyes modellparaméterek öregítési időtől való függésének közelítésére.** Ezek lehetővé teszik az eltelt öregedési idő figyelembevételét a multi-domain LED modellünkben (4. ábra). Az így kialakított modellel számított radiometriai fluxus karakterisztika nagyon jól közelíti a mérési eredményeket (5. ábra). E kísérlet eredményeit a 2019. szeptember 25-27 között az olaszországi Leccoban megrendezett 25. TERMINIC Workshop 'Reliability' szekciója keretén belül egy szóbeli előadás és egy konferencia közlemény formájában mutattuk be először [C2].

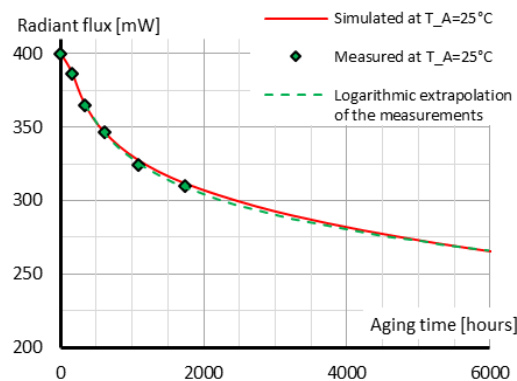
A Delphi4LED projekt CoB (chip on board) LED modellezéssel kapcsolatos feladatai kapcsán méréseket végeztünk a fehér LED-ekben alkalmazott fényforrási rétegek tulajdonságaival kapcsolatban. A CoB modellezési munkához (amelyben felhasználtuk a [J1]-ben ismertetett chip szintű multi-domain LED modellünket is) egyszerű, jól követhető teszt struktúrára volt szükség, ezért gyári fehér LED-ek eredeti fényforrási rétegét eltávolítottuk, és az így kapott kék LED-eket karakterizáltuk, majd ezen LED-eket saját fényforrási réteggel ellátva, újból megmértük azokat. **Jelen kutatási projektünk szempontjából ennek az volt a jelentősége, hogy kidolgoztunk egy olyan módszert, amelynek révén egymásnak ismert módon, pontosan megfelelő kék és fehér LED minta-párokat tudunk készíteni. Az ilyen párok öregítése révén lehetőségünk van a LED lapka szintjén, illetve a fényforrás+lencse szinten fellépő öregedési folyamatok hatásainak elkülönítésére.** E témáról 2 konferencia közleményben és egy folyóirat cikkben számoltunk be [C3], [C4], [J2]. (Hasonló kék-fehér LED párokon mért spektrumokat felhasználva készítettünk későbbi spektrum modelleket, lásd ezen jelentés egy későbbi fejezetét.)

Az első évben végzett, fent vázolt munkánk eredményeként pontosabban is meg tudtuk fogalmazni a LED élettartam vizsgálatokkal kapcsolatos jelenlegi problémákat és az eindhoveni Signify vezetete nemzetközi konzorciummal a LED-ek élettartam mérésével és modellezésével kapcsolatos új **H2020-as pályázatot** dolgoztunk ki és nyújtottunk be (H2020-ECSEL-2019-2-RIA-878396-2 TwinLED pályázat). A pályázat második fordulójában beadott részletes projektjavaslat szakmai kidolgozásának nagy részét a mi csoportunk végezte. A TwinLED pályázat kibővített és átdolgozott változata **AI-TWILIGHT [32] néven 2020-ban támogatást nyert** (lásd később).

$$V_{F,T_J=T_{ref}} = I_F \cdot R_S + m \cdot U_T \cdot \ln \left[\left(\frac{I_F}{I_0} \right) + 1 \right]$$



4. ábra: LM-80 szabvány szerint öregített LED-ek karakterisztikákra illesztett modellegyenlet paramétereinek öregítési időtől való függése.

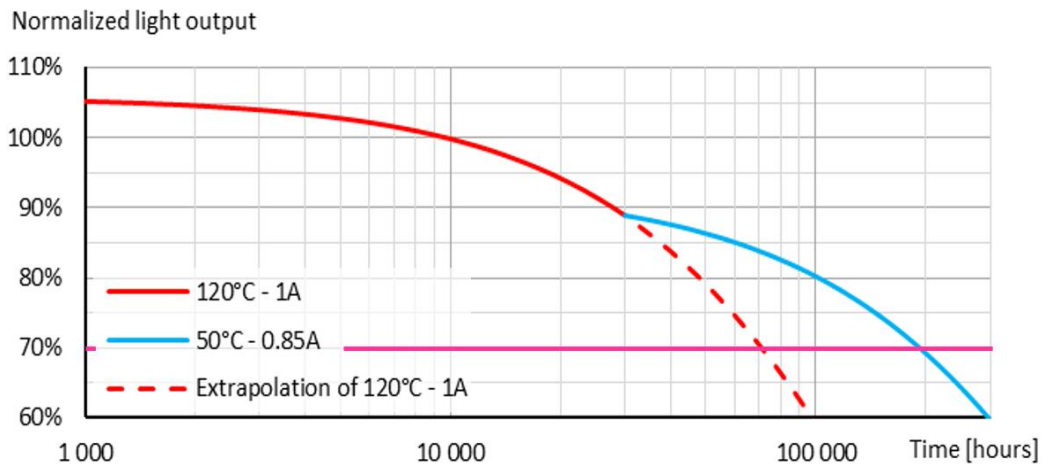


5. ábra: A 4. ábra szerinti modellel számított radiometriai fluxus illeszkedése a mért fluxus értékekhez.

A projekt második évében véglegesítettük és publikáltuk azt a modellünket, amelynek segítségével a LED-ek szabványos LM-80-as [22] mérési eredményeit felhasználva a teljes üzemidő alatt az üzemi

hőmérséklet és nyitóáram profil függvényében vizsgálható a LED-ek mindenkori állapota, vagyis az öregedés folyamata. Ennek segítségével elvi modellt készítettünk egy teljes LED élettartamra vonatkozó állandó összfényáramú vezérlésre, amely egyaránt figyelembe veszi a hőmérsékletváltozás és az öregedés hatásait [J3].

Ezt felhasználva, archív meteorológiai adatok alapján megbecsültük egy LED-es közvilágítási világítótestnek a teljes LED élettartamra vonatkozó állandó fényáramú vezérlési séma melletti villamosenergia-megtakarítási lehetőségeit, illetve az így elérhető LED élettartam-növekedést.



6. ábra: A "lifetime budget" fogalmának magyarázata: standard öregítési körülmények között tapasztalható öregedési görbéhez (itt: fényáramtartás, vörös görbe) képest megváltozott működési körülmények gyorsítják, vagy lassítják (kék görbe) az öregedés folyamatát, növelve vagy csökkentve a LED várható élettartamát. A nyitóáram és a hőmérséklet hatását az Arrhenius egyenlettel lehet figyelembe venni.

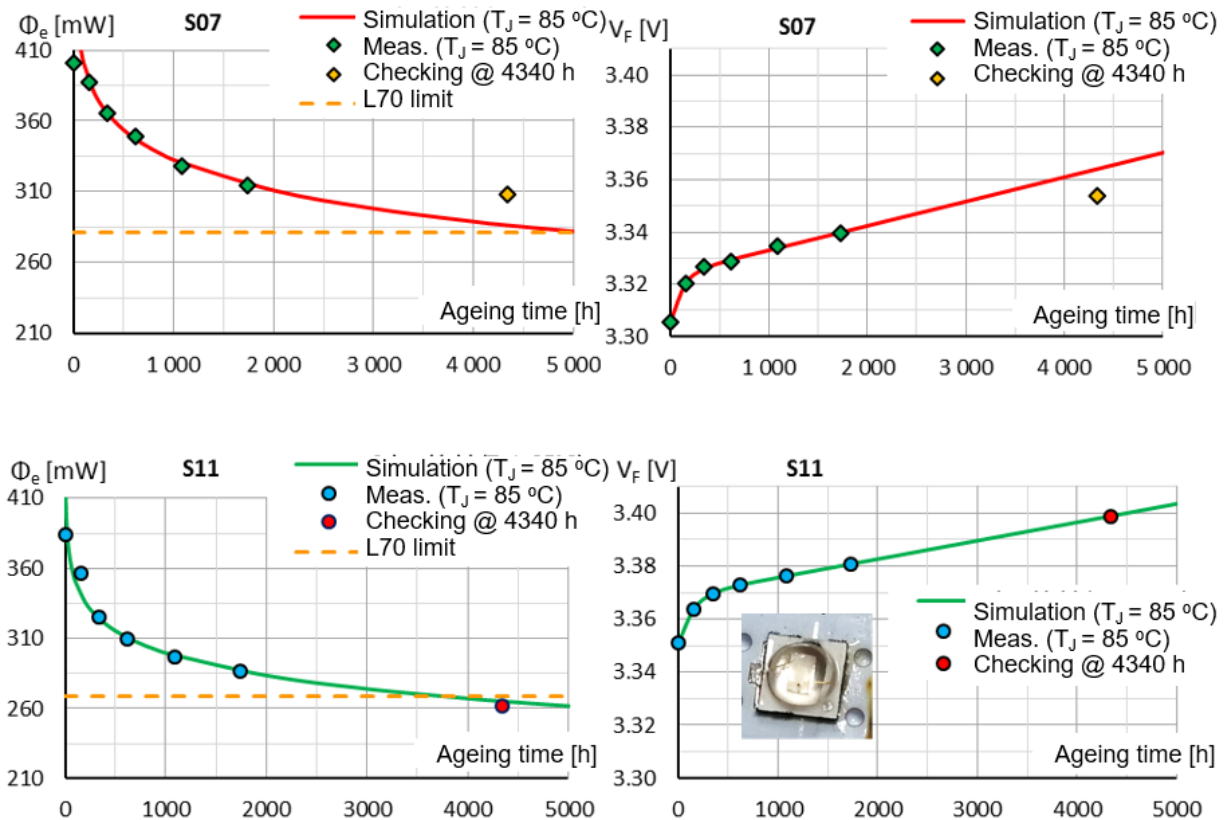
Definiáltuk a "lifetime budget" fogalmát (laboratóriumi körülmények közt meghatározott, adott pn átmenet hőmérsékletre és nyitóáramra vonatkozó, egy adott üzemidő vonatkozásában érvényes várható hátralévő élettartam), amely az aktuális hőmérséklet és nyitóáram függvényében gyorsabban, illetve lassabban "fogy". **Ez hatások jelleggel írja le a LED-ek állapotát a 0 óras kezdeti állapotukhoz képest** (6. ábra). E mennyiség számítására vonatkozó összefüggést adtunk a kémiai reakciókinetika alapösszefüggéseinek analógiája alapján. A fentieket összesen 7730 óra üzemidőnek megfelelő, korábbi mérési eredményeink újbóli adatelemzésével állapítottuk meg. E munka során az előző időszakban elkészített Excel alapú modellparaméter-illesztő automatát használtuk, illetve fejlesztettük tovább.

2019. szeptembere és 2020. márciusa közt folytattuk a korábbi Seoul 2525 típusú LED-ek öregítését. Sajnos a kezdeti LED populációból csak 2 példány maradt mérhető állapotban (több tucat hőmérséklet-nyitóáram párt felölelő izotermikus IVL karakterizálás számára). Ezekkel 4000 órás öregítést sikerült elérnünk. E példányok vonatkozásában a korábbi, 2000 órás öregítési időszak mérési eredményeihez illesztett üzemidő függő modellparaméterekkel a 4000 órás állapotra vonatkozó predikció pontosnak bizonyult (7. ábra).

Megjegyzendő azonban, hogy a modellalkotásnál a LED-ek kezdeti, kb. 100 óra nagyságrendű beégetődési szakaszra vonatkozó mérési adatokat figyelmen kívül kell hagyni, azokra az általunk javasolt modell nem érvényes. A továbbfejlesztett modell alkalmas módon leírja a kezdeti beégetődés (kb. az első 100 óras működés) utáni üzemi chip hőmérséklet, nyitófeszültség és sugárzott teljesítmény értékeket. **A modell lényegében a Delphi4LED típusú multi-domain LED modell főbb paramétereinek (pl. szaturációs áramok,**

idealitási tényezők, soros ellenállás) üzemidő függő változásaira ad analitikus összefüggéseket. E munka eredményeit egy open access folyóirat cikkben publikáltuk [J3].

E modellalkotási folyamat nagy hátránya hatalmas laboratóriumi erőforrás igénye. A Seoul 2525 LED minták izotermikus karakterizálásának szükséges idejét igyekeztük a minimálisra szorítani, ennek megfelelően a mérendő munkapontok számát úgy határoztuk meg, hogy az még éppen elegendő legyen a multi-domain modellek elkészítéséhez. A LED-ek igen kis méretének köszönhetően a termikusan stabil állapot eléréséhez szükséges idő is csupán a 30... 60 másodperces tartományba esett (amely egyébként az öregedés előrehaladtával sajnos növekedett). A minták teljes karakterizálása azonban így is minden szükséges ellenőrző mérés és minta esetén kb. 3 órát vett igénybe. A vizsgálat során elvégzett, összesen 87 ellenőrző mérést tekintve ez körülbelül 260 órányi mérési időt jelentett, amely a teljes 1.735 órás tesztidő további közel 15%-át igényelte. Ha a TM-21-11-es eljárás [24] szerint szükséges minimális, 90 db-os mintaszámot feltételezzük (3 nyitóáram érték, 3 teszt hőmérséklet, melyek mindegyikén legalább 10 minta vizsgálata szükséges), illetve ha a teljesítmény LED-ekre sokkal inkább jellemző, legalább 6-8 órás karakterizálási idővel számolunk, akkor az 1.000 óránként szükséges ellenőrző mérésenként kb. 500... 700 órányi mérés elvégzése szükséges.



7. ábra: 2000 órás öregítési adatokra illesztett modell (fényáram, nyitófeszültség) prediktív ereje: a 4000 órás öregítés után mért paramétereket a modell pontosan jóslta meg.

A jelenleg a piacon elérhető, az izotermikus LED karakterizálásra alkalmas mérőműszerek árát figyelembe véve a mérések párhuzamosított végzése rendkívül költséges lenne. A mérési időt csökkentő mérési eljárás kidolgozása, illetve a LED karakterizáló mérőberendezés és az azt vezérlő szoftver optimalizálása

nagymértékben javítaná a LED-ek élettartam modellezésének lehetőségeit. Ennek megvalósítása egy fontos célkitűzése a már említett **AI-TWILIGHT [32] nevű, H2020 ECSEL-2020-2-RIA 101007319-2 sz. nemzetközi kutatási projektnek**, amelyben a következőkre helyeztük a hangsúlyt:

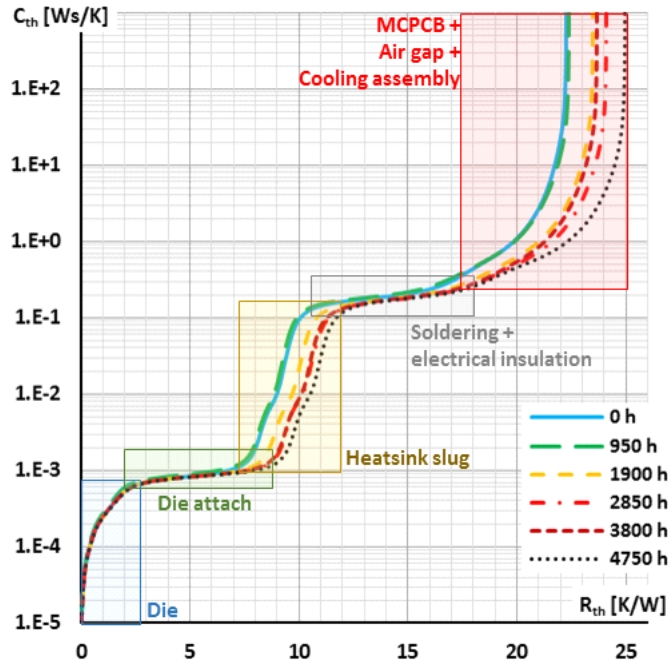
- a multi-domain LED modellezéshez szükséges izotermikus LED karakterizáló mérések egy adott LED populációra vonatkozó átviteli kapacitásának (throughput-jának) 1 nagyságrenddel való növelése,
- a hosszadalmas LM80 szerinti öregítési eljárás potenciális kiváltása mesterséges intelligencia módszereket felhasználó adatelemzéssel,
- nagy világítási infrastruktúrák (közvilágítás, irodaház, üvegház), illetve biztonságkritikus alkalmazások (pl. autófényszórók) vonatkozásában a LED-es világítótestek működését monitorozó digitális ikrek és predictive maintenance sémák kidolgozása.

A jelen OTKA projektben (NKFIH K 128315) végzett úttörő jellegű munkánk révén jelentős szerepünk volt az AI-TWILIGHT H2020 ECSEL RIA 101007319 sz. pályázat kidolgozásában, amelynek fő célja jelen projektünk célkitűzéseinek továbbfejlesztésén túl a várható eredmények ipari gyakorlatba való meghonosításának az előkészítését célozzák. A 2020. szeptemberében benyújtott fenti pályázatunk támogatást nyert és a 8 európai országból 24 partnert felsorakoztató projekt 2021. június 1-én hivatalosan a kezdetét vette. A projekt koordinátora a Signify cég (Philips Lighting utódja). Jelentős ipari partnerek: Lumileds, Hella, BMW, Infineon, GL Optik, LightingLab, PI-Lighting, TRIDONIC. Jelentős egyetemi partnerek: TU Delft, TU Eindhoven, TU Darmstadt, Padova University.

A fent említett AI-TWILIGHT projektbeli partnereknek köszönhetően lehetőségünk nyílt/nyílik nagyobb, és a LED öregedés vizsgálata szempontjából releváns LED populációhoz hozzájutni. Ugyancsak széleskörű konzultációra nyílt lehetőségünk a **LED élettartam tesztelés során végzendő kombinált termikus és radiometriai/fotometriai LED mérések (izotermikus IVL karakterisztikák felvétele) kb. 1 nagyságrenddel való gyorsítását célul kitűző koncepció** kialakítását illetően [C5], [C6]. Ehhez szorosan csatlakozik a CIE (Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság) TC2-91-es műszaki bizottságában [33] való aktív közreműködésünk. E munka a korábbi, a LED-ek optikai méréseivel foglalkozó CIE 225:2017 és CIE 226:2017 jelű műszaki jelentésekben ismertett laboratóriumi és gyártósori LED mérési eljárások egységesítését és szabványosítását célozza. **E nemzetközi együttműködések együttesen azt eredményezik, hogy jelen OTKA projektünk szerinti új öregedés indikátorok meghatározásához szükséges LED mérési eljárásokra vonatkozó munkánk a tudományos célok elérésén túl ipari relevanciával is bírnak.**

Így pl. az AI-TWILIGHT projektben partner a Padovai Egyetem prof. Matteo Meneghini vezette LED megbízhatósági és élettartamvizsgálati kutatócsoportjával közösen új, gyorsított LED öregítési kísérleteket definiáltunk és indítottunk. **Ugyancsak új, teljesítménycikláláson alapuló LED öregítési teszteket indítottunk a leobeni Materials Reserch Center kutató intézettel együttműködve. Több LED populációt vizsgálunk, különböző frekvenciájú négyszögjellel meghajtva.** Célunk kettős volt: azon hipotézisünk megerősítése vagy cáfolata, hogy létezik egy olyan frekvencia, ahol az öregedés kifejezetten gyors, másrészt az ezen fárasztásos tesztek során felvett struktúrafüggvényekhez (pl. 8. ábra) illesztett kompakt termikus modellek idősorával próbáljuk modellezni a LED tokok junction-to-ambient hővezetési útja különböző szakaszai degradálódásának időbeli lefolyását [C7]. Az első teljesítményciklálós teszt sorozatról a 28. THERMINIC Workshop-on számoltunk be [C8]. **A mérési eredmények végső kiértékelése alapján azt mondhatjuk, hogy az 1 kHz alatti frekvenciájú PWM dimmelésnek szignifikáns hatása van a LED chipprögítő rétegre [J4], a vizsgált LED minták esetében 313 Hz környékén tapasztaltuk a legnagyobb hatást.** A pulzusszélességmoduláció kitöltési tényezője is hatással van az öregedésre, 50%-os

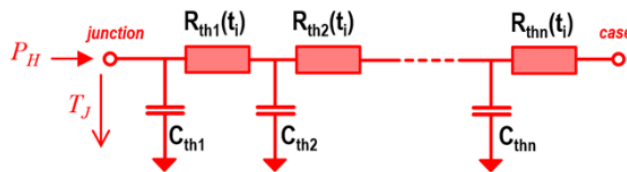
kitöltési tényező esetén okozva a leggyorsabb öregedést. Érdekes megjegyezni azt, hogy egy dekáddal magasabb (pl. 10 kHz felletti) modulációs frekvenciák esetében PWM dimmelésnek már nincs lényeges öregedést gyorsító hatása [J4]. Ez az eredmény az emberközpontú LED-es világítási rendszerek szempontjából fontos, mert szintén 10 kHz környékére esik az a határfrekvencia, ahol a modulált fény nem tudatosuló hatásai (pl. az arra hajlamos egyéneknél epilepsziás rohamot is kiváltó hatás) a humán kísérletek szerint eltűnnek [34].



8. ábra: Pulzus-szélesség modulációval meghajtott LED-ek öregítése közben felvett struktúrafüggvény sorozat [J4] a chip rögzítő réteg degradációjára utal.

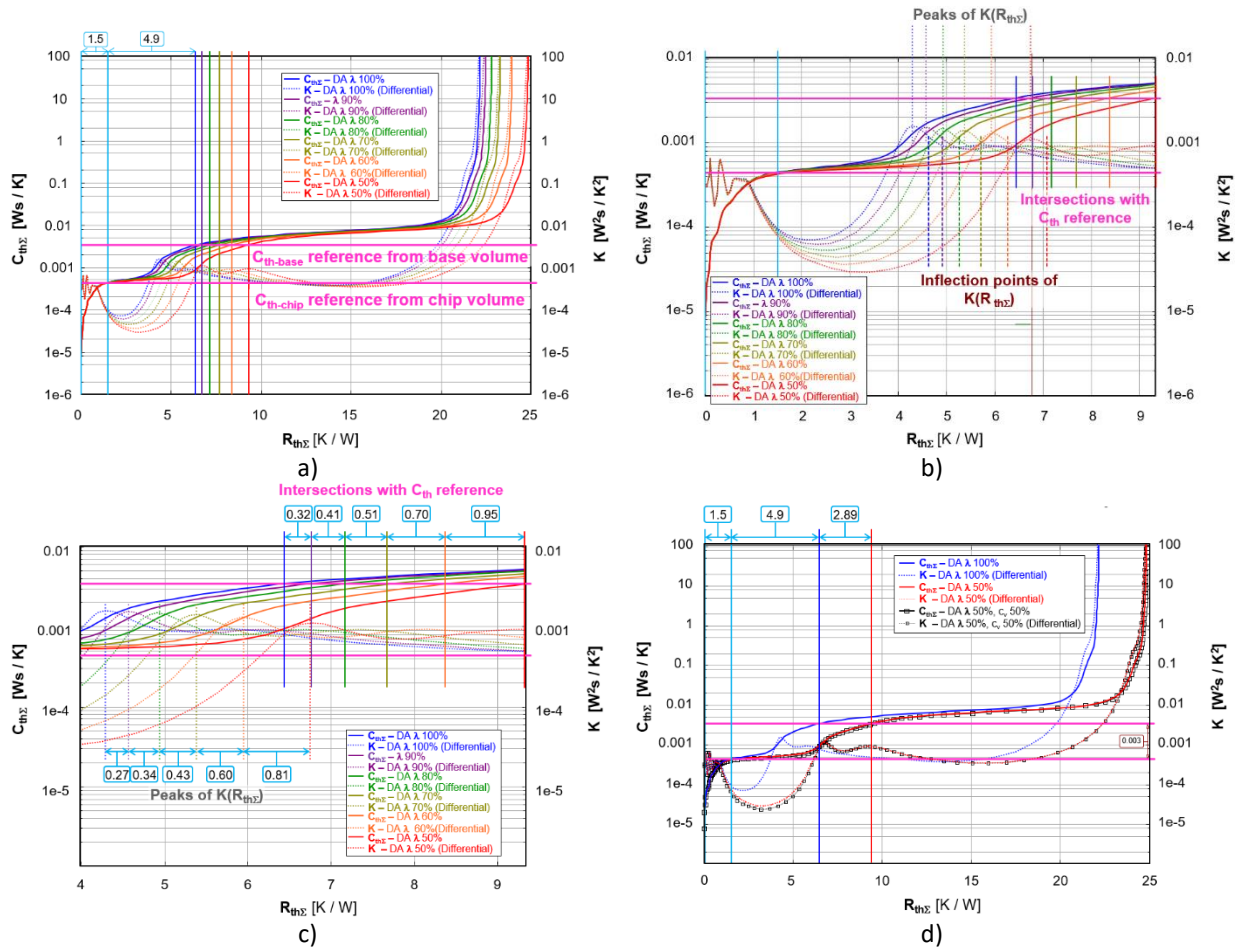
Az öregítési mérések kapcsán számos probléma merült fel. Ilyen pl. a lencse barnulása miatt hibásan megállapított LED junction hőmérséklet kérdése. Erről a 28. THERMINIC Workshop-on prezentált második cikkünkben számoltunk be először [C9]. E konferenciaközlemények megszületéséhez jelentős mértékben hozzájárultak a jelen OTKA projekt terhére a BME Elektronikus Eszközök Tanszéke Termikus és Megbízhatósági Laboratóriumában foglalkoztatott egyetemi hallgatók (Lukács Máté, Bodnár Bence) mérései.

Fontos megállapítsunk továbbá az, hogy a DC tápláláshoz képest jelentős a PWM meghajtás fokozott öregítő hatása. A fenti 3 témakörrel szól egy 2023-as early access folyóirat cikkünk [J4] és a 2023-as CIE konferenciára elfogadott egyik közleményünk [C10].



9. ábra: LED tokok termikus kompakt modelljének öregedési idő (t) függő változata [C7]. Vizsgálataink szerint a hőkapacitásokban nem lépnek fel szignifikáns változások, így a modellben konstans hőkapacitásokkal lehet számolni.

E részterülethez kapcsolódóan szimulációs kísérleteket végeztünk arra vonatkozólag, hogy az öregedés következtében a LED tokok fizikai struktúrájában bekövetkező degradáció hatását tükröző termikus kompakt modell elemeinek a termikus struktúra függvényekből történő meghatározására mi a legjobb gyakorlati módszer és az élettartam prognosztika [37] támogatására szolgáló ilyen modell (9. ábra) vonatkozásában milyen egyszerűsítésekkel élhetünk. Ezen eredményeinkről egy elfogadott konferenciaközleményben számolunk be [C7]. E szimulációs kísérletekben alapvetően a LED lapka rögzítő rétegének (*die attach* réteg), a 8. ábrán is látható öregedését emuláltuk. Eredményeinket a 10. ábra foglalja össze:



10. ábra: LED tokok hővezetési útja egyes elemeinek szimulációs kísérletekkel emulált degradációjának megjelenése a LED lapkahőmérséklet tranziens válaszából számított struktúra függvényeken [C7]: a) a die attach réteg parciális hőellenállásának meghatározása a LED chip hőkapacitása és a lapkát hordozó alaplemez hőkapacitása által kijelölt metszéspontokkal, különböző öregedési tényezőket feltételezve, b) a parciális hőellenállás alternatív megállapítása a differenciális struktúra függvény maximum helyei vagy inflexió pontjai segítségével, c) a referencia hőkapacitás értékkel vett metszéspontok, illetve a differenciális struktúrafüggvény maximum helyei segítségével megállapított, öregedésfüggő hőellenállás növekmények összehasonlítása, d) a die attach réteg változó hőkapacitásának figyelembevételével (fekete görbék, fekete markerekkel) és annak elhanyagolásával (vörös görbék).

Főbb megállapításaink a következők:

- A die attach réteg hőellenállását a legegyszerűbben $C_{th\lambda}(R_{th\lambda})$ struktúra függvényből a chip és az azt hordozó réz alaplemez hőkapacitásainak megfelelő $R_{th\lambda}$ koordináták metszéspontjaként definiálhatjuk – lásd a 10a. ábrán a kék, lila, zöld, mustársárga, narancs és piros színű függőleges vonalakat

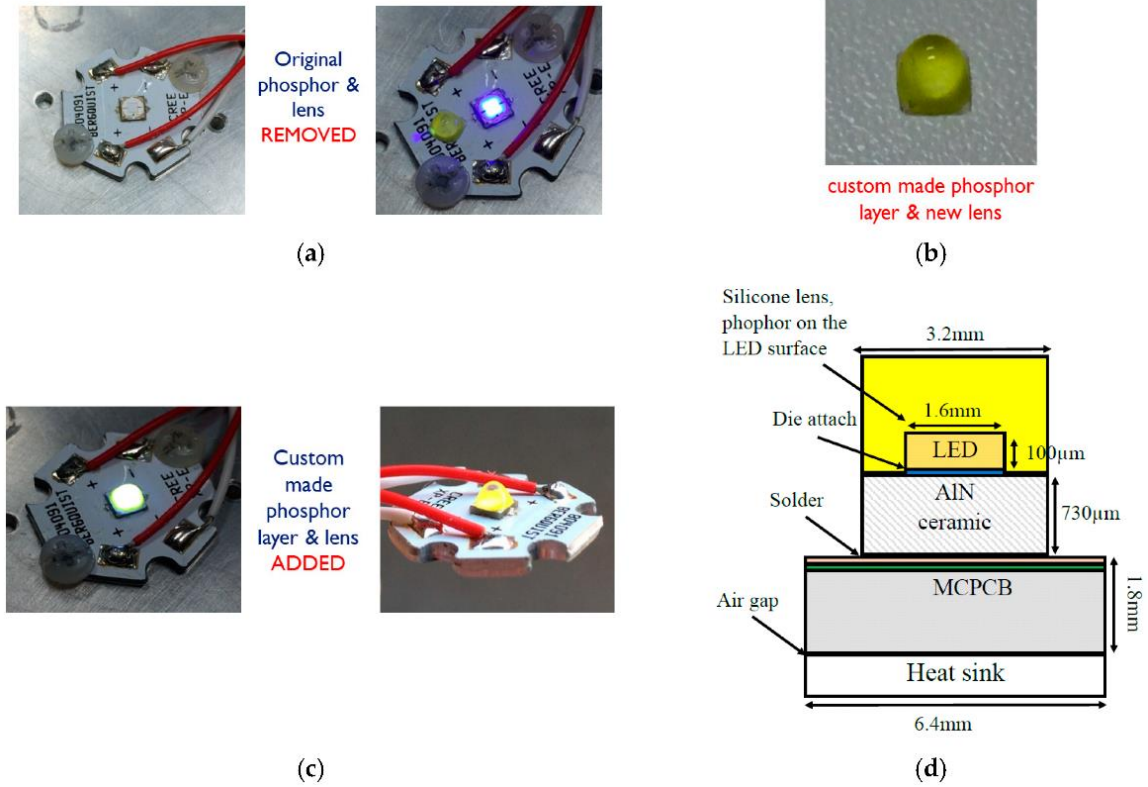
- Alternatív módszert jelent a $K(R_{th\Sigma}) = dC_{th\Sigma}/dR_{th\Sigma}$ differenciális struktúra függvény maximum helyei (esetleg inflexiós pontjai) közötti távolságokkal definiálni a die attach réteg hőellenállását, de a $K(R_{th\Sigma})$ függvény origó környéki fals maximumai megnehezítik e módszer automatikus identifikáló eljárásban való használatát – lásd a 10b. ábrát.
- A $C_{th\Sigma}(R_{th\Sigma})$ struktúra függvények konstans kapacitás értékkel való metszéspontjai közötti távolságoknál a $K(R_{th\Sigma})$ differenciális struktúra függvény maximum helyei között távolságok kisebbre adódnak, de a vonatkozó rész-hőellenállás növekmények arányai azonosak, így ha maradó élettartamra vonatkozó előrejelző algoritmus [37] számára elgondolható csak a hőellenállás értékek változása, akkor a metszéspontok használata előnyösebb.
- A die attach réteg hőkapacitásának esetleges öregedés miatti változása nincs érdemleges hatással a struktúra függvényekre (10d. ábra), így mind a multi-domain LED szimulációk során használandó tok modellnél (9. ábra) konstans hőkapacitásokkal számolhatunk, és várhatólag ez a helyzet a maradó élettartamra vonatkozó előrejelző algoritmusok (mint pl. a [37]-ben közölt módszer) esetében is.

Ahogy a bevezetőben említettük, a **LED-ek emissziós spektrumának modellezésével is foglalkoztunk**, de erre csak a projekt utolsó szakaszában került sor. Ennek ellenére számos eredményt értünk el. Így például:

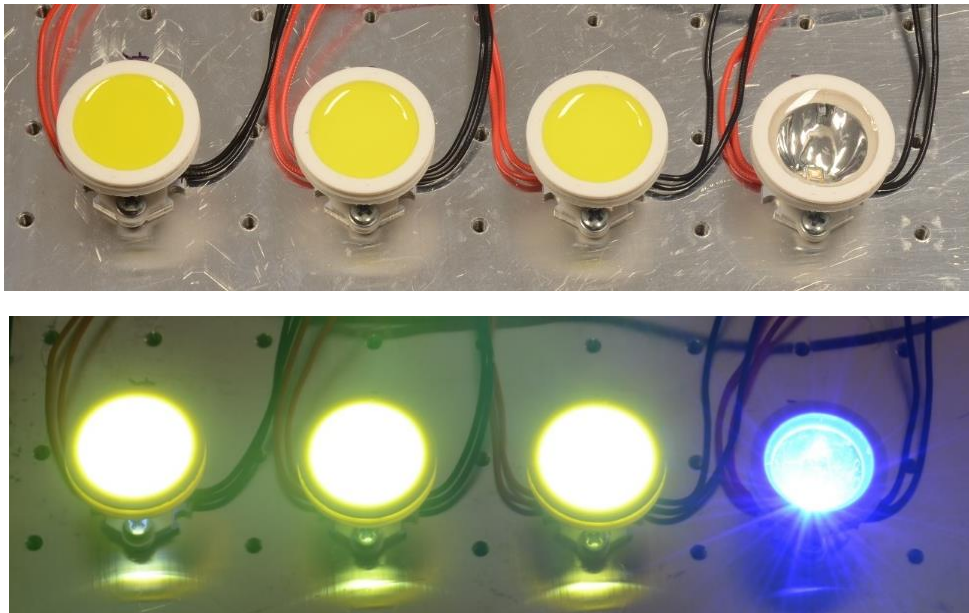
- Módszert dolgoztunk ki két LED lapkát, illetve két LED lapkát és fényport tartalmazó LED fényforrás párok spektrális teljesítményeloszlásának pontos kísérleti tanulmányozására (kontrollált tulajdonságú, saját egyedi LED minták készítése – lásd a 11. és 12. ábrát) [J2], [C3], [C4], [C11], amelyek lehetővé teszik hogy egy fehér LED spektrumát szétválasszuk a kék primer sugárzás, és a fényport által ebből konvertált, rövidebb hullámhosszúságú szekunder sugárzás spektrumára (13. ábra) [C11]. Ez lehetővé teszi a monokromatikus (kék mellett pl. a vörös és zöld LED-ek) spektrumának és a konvertált fény spektrumának külön-külön történő modellezését [C11]. A legutóbbi mintakészítési eljárásunkat a [C11] közlemény részletezi.
- Módszert dolgoztunk ki a saját készítésű fénypor rétegeink egyes tulajdonságai (pl. konverziós hatásfok) hőmérsékletfüggésének meghatározására [C3] és modellezésére [J2].
- Különböző pontosságú metrikákat fogalmaztunk meg a spektrum modellek jóságának vizsgálatára [J5], [C11], [E6], amelyek segítségével számos, az irodalomban publikált spektrum modell pontosságát tekintettük át. Ezek közül az irodalomban *Split Pearson VII* néven ismert modell nagyon pontosnak mutatkozott ezen metrikák szerint. Meghatároztuk és modelleztük a spektrumok lapkahőmérséklet és nyitóáram függését is. E függés leírását egy harmadfokú polinom illesztésével oldottuk meg, amelynek a jóságát szintén többféle metrika szerint vizsgáltuk. Öregített spektrumok vizsgálatára jelen projekt tartama alatt már nem került sor. E vizsgálatokat az AI-TWILIGHT H2020 ECSEL projekt keretén belül folytatjuk.

A munka során az irodalomból ismert modelleket (l. táblázat) vizsgáltunk és a modellek „jóságának” jellemzésére több metrikát is kipróbáltunk a spektrumok különböző jellemző vonatkozásában (pl. a spektrumból számított teljes radiometria fluxusok illeszkedése, a spektrumból számított szinkordináták illeszkedése, a mért és modellezett spektrumgörbék illeszkedése). Az alkalmazott metrikák a következők voltak:

- regressziós négyzetösszeg (SSR),
- eltérés-négyzetösszeg (SSE),
- átlagos négyzetes eltérés (MSE),
- normalizált négyzetes középérték hiba (NRMSE),
- a mért és a modellezett spektrális teljesítmény értékek maximum eltérése százalékban ($Max \Delta\%$),
- méréssel meghatározott és a görbeillesztés után kapott csúcs hullámhosszak eltérése ($\Delta\lambda_{peak}$) [nm]



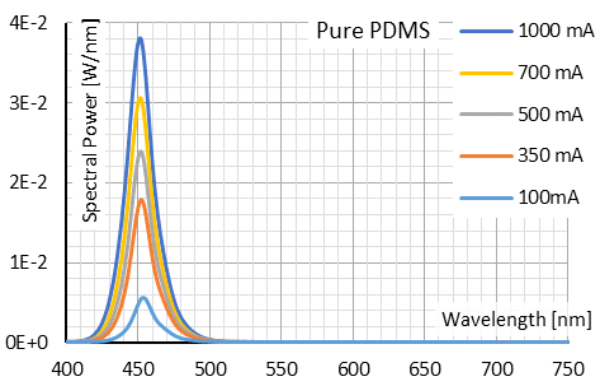
11. ábra: Az első kísérleti kék és fehér LED párok: a) eredeti lencséjétől és fénypor rétegtől megfosztott csupasz kék LED, b) saját készítésű, ismert tulajdonságokkal rendelkező fénypor réteg és lencse, c) az ezekből készített fehér LED, d) ezen fehér LED szimulációs kísérletekre szolgáló egyszerűsített geometria modelljének vázlata [J2], [C3].



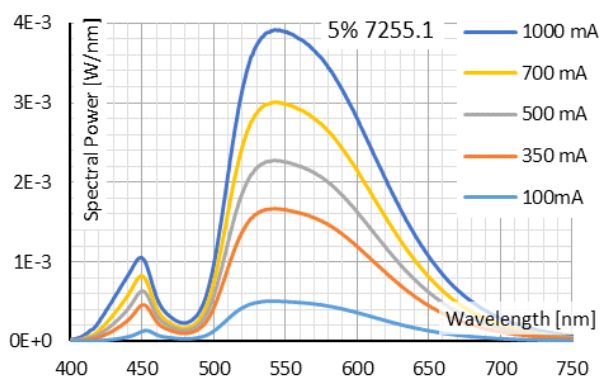
12. ábra: Saját készítésű, távoli fénypor réteggel ellátott fehér és fénypor réteg nélküli kék LED fényforrások a pontos spektrum modellek fejlesztése számára [C11].

I. Táblázat. Monokromatikus LED-ek spektrális teljesítményeloszlásának modellezésére javasolt matematikai függvények; a 2008-as tanulmány [35] 3-as számú táblázata alapján.

Függvény neve	Függvény $f(\lambda)$	
Gaussian	$f(\lambda) = A \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2}$	(1)
Split Gaussian	$f(\lambda) = A \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2} \begin{cases} \text{ha } \lambda < C, \text{ akkor } W = W_1 \\ \text{egyébként } W = W_2 \end{cases}$	(2)
Sum of Gaussian	$f(\lambda) = A_1 \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-C}{W_1}\right)^2} + A_2 \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-C}{W_2}\right)^2}$	(3)
Second order Lorentzian	$f(\lambda) = \frac{A}{\left(1 + \left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2\right)^2}$	(4)
Logistic Power Peak	$f(\lambda) = \frac{A}{S} \left(1 + e^{\frac{\lambda-C+W \cdot \ln(S)}{W}}\right)^{-S-1} \cdot e^{\frac{\lambda-C+W \cdot \ln(S)}{W}} \cdot (S+1)^{\frac{S+1}{S}}$	(5)
Asymmetric logistic peak	$f(\lambda) = A \left(1 + e^{\frac{\lambda-C+W \cdot \ln(S)}{W}}\right)^{-S-1} \cdot S^{-S} \cdot e^{\frac{\lambda-C+W \cdot \ln(S)}{W}} \cdot (S+1)^{\frac{S+1}{S}}$	(6)
Pearson VII	$f(\lambda) = \frac{A}{\left(1 + \left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2^S - 1}\right)\right)^S}$	(7)
Split Pearson VII	$f(\lambda) = \frac{A}{\left(1 + \left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2^S - 1}\right)\right)^S} \begin{cases} \text{ha } \lambda < C, \text{ akkor } W = W_1, S = S_1 \\ \text{egyébként } W = W_2, S = S_2 \end{cases}$	(8)
Asymmetric Double sigmoidal	$f(\lambda) = \frac{A}{1 + e^{\frac{\lambda-C}{S_1}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\frac{\lambda-C}{S_2}}}\right)$	(9)



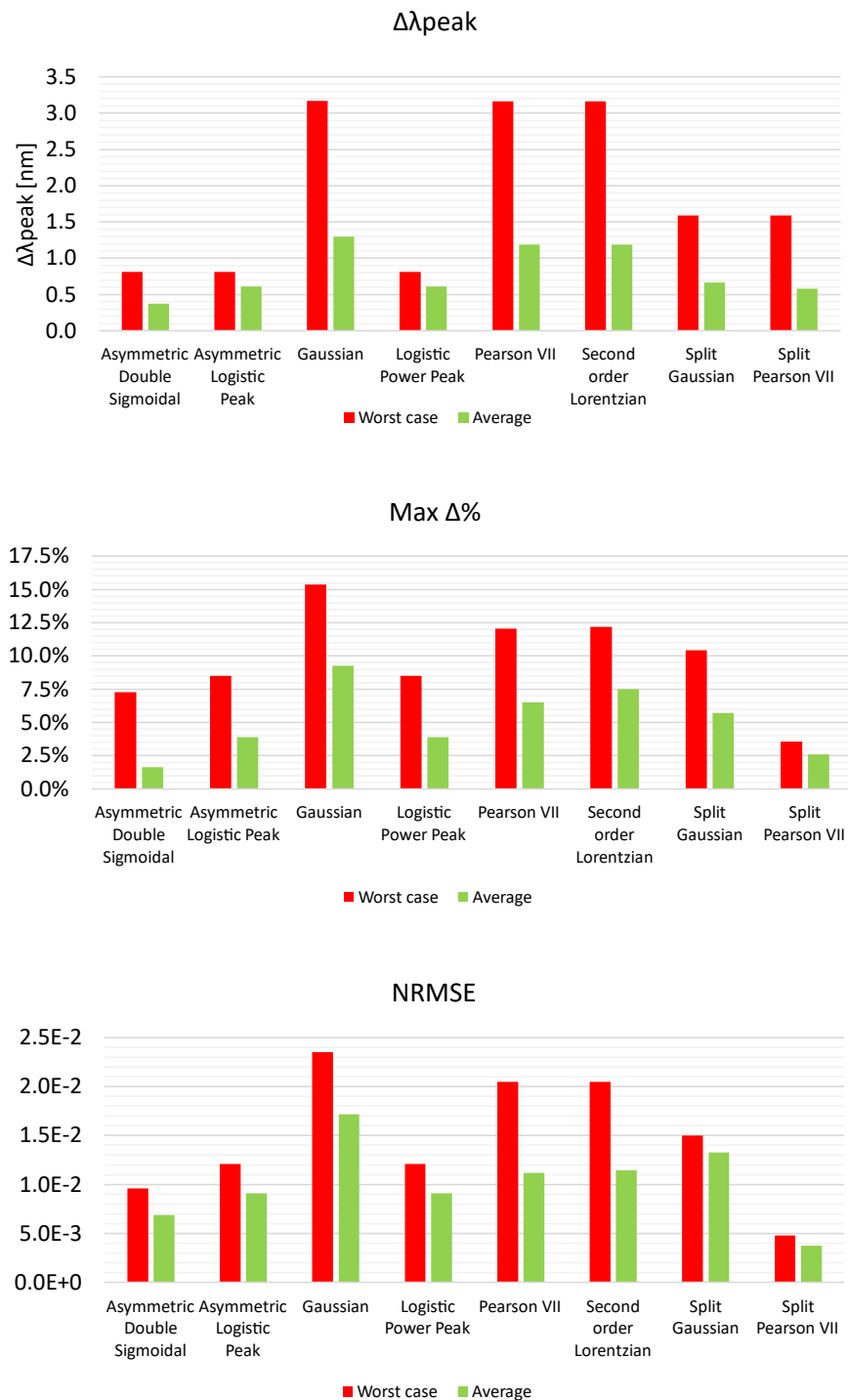
a)



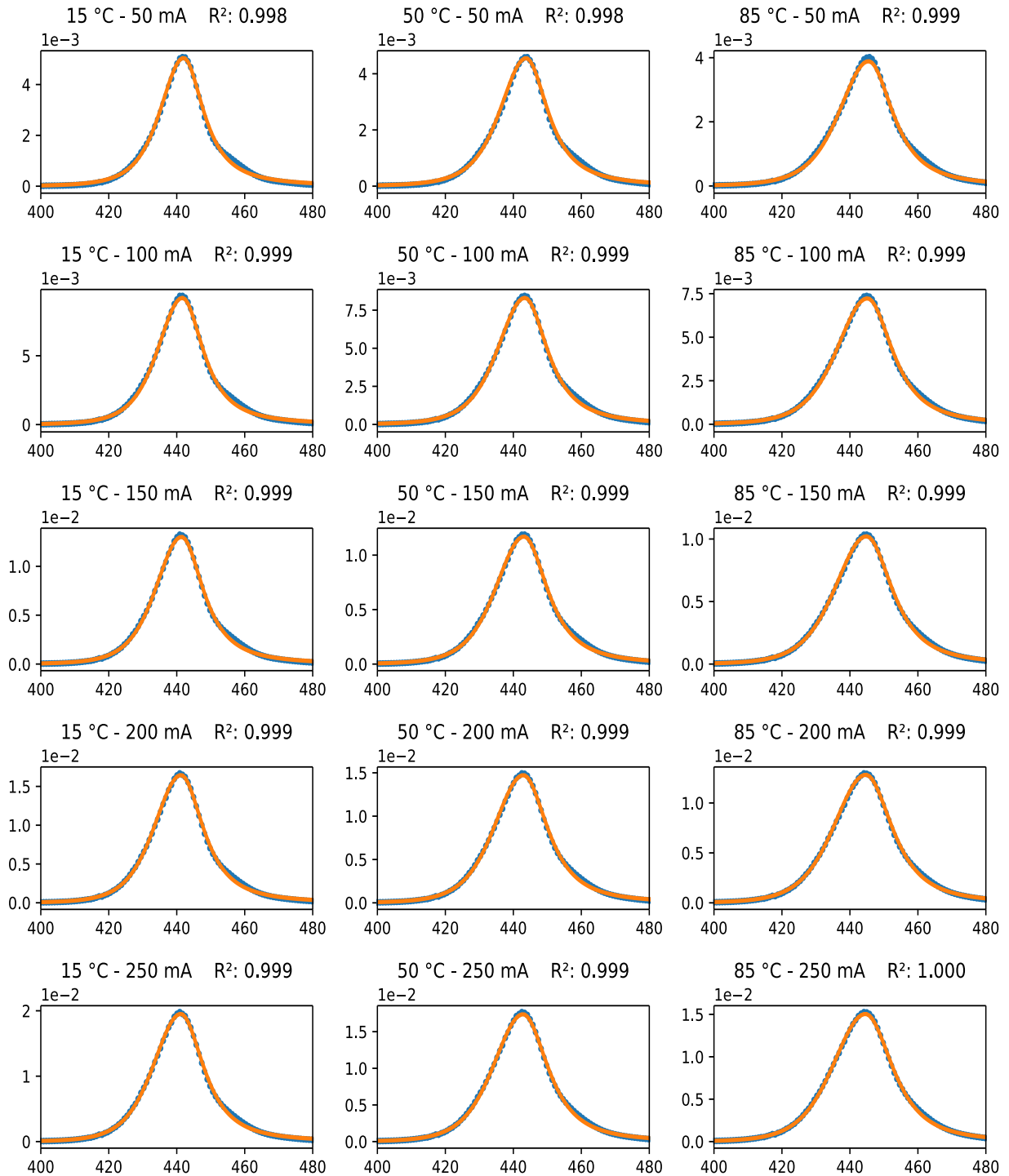
b)

13. ábra: A 12. ábra szerinti kék és fehér LED-ek különböző munkapontokban mért spektrumai: a) egy fénypor réteg nélküli kék LED spektruma, b) egy fénypor réteggel ellátott fehér LED spektruma [C11].

A 14. ábra az I. táblázat szerinti modellek különböző metrikák szerinti legjobb, illetve legrosszabb illeszkedését szemlélteti egy több, különböző színű LED-ből kialakított nagyobb populáció vonatkozásában.



14. ábra: Az I. táblázat szerinti spektrum modellek kiértékelése egyes hibametrikák szerint, több különböző színű monokromatikus LED (pl. Osram Osleon® SSL 80 típusú piros és Osram Osconiq® P 2226 típusú kék LED) kevert populációja vonatkozásában: a legrosszabb illeszkedést a vörös szín, a legjobb illeszkedést a zöld szín jelzi.

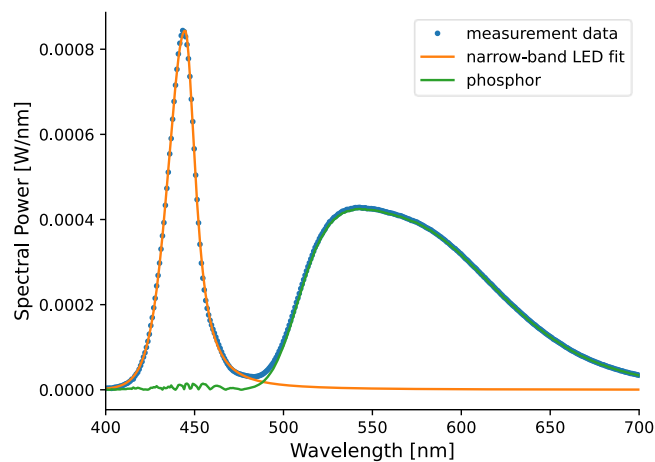


15. ábra: Polinomiális regressziós modell (narancssárga görbe) összehasonlítása a mért spektrális teljesítményeloszlásokkal (kék pontozott görbe) az eredeti munkapontokban. A vízszintes tengely minden esetben a nanométerben megadott hullámhossz, a függőleges tengely pedig a W/nm-ben megadott spektrális teljesítménysűrűség [C11].

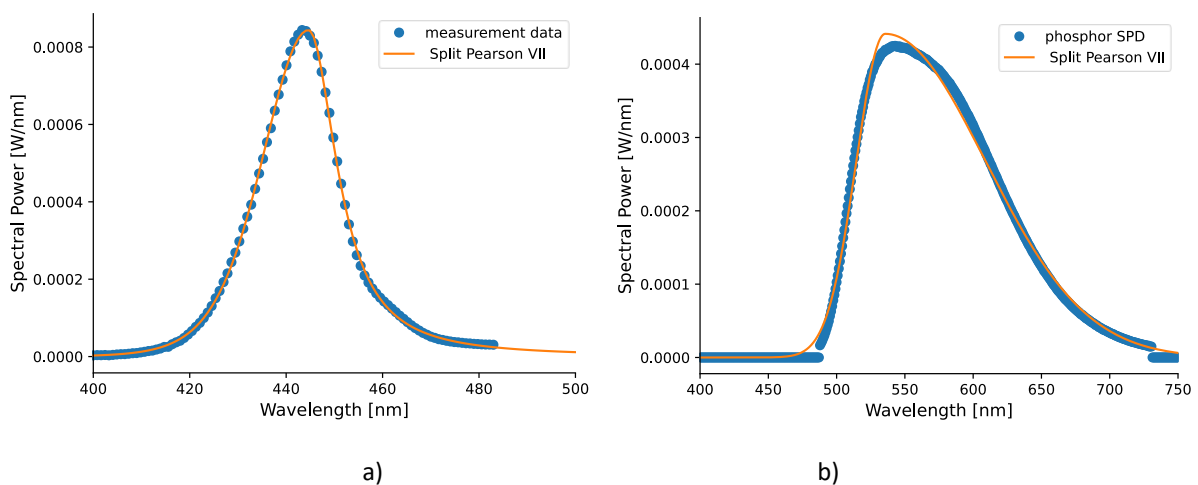
A spektrum modell paraméterek (pl. csúcshullámhossznál mért amplitúdó) munkapontfüggésére használt polinomiális modelleket a Split Pearson VII modellel kombinálva egy összesen 36 paraméterrel rendelkező végső modellt kaptunk.

A 15. ábra ezzel az összetett modellel jellemzett kék LED spektrumot mutat be, 12 különböző munkapont (áram és feszültségpárok) esetében.

A monokromatikus LED spektrumok modellezésén túl a Split Pearson VII modell alkalmasnak bizonyult fényporos fehér LED-ek fénypor által konvertált szekunder sugárzásának a modellezésére is. Ehhez a fehér spektrumot (pl. 13. b) ábra) szét kell választanunk a kék primer, és a fénypor által konvertált, nagyobb hullámhosszúság szekunder sugárzásra. Erre egy automatikus eljárást definiáltunk. E szétválasztás eredményét szemlélteti a 16. ábra. A szétválasztott spektrum összetevőkre vonatkozó modell-eredményeket mutatja be a 17. ábra.



16. ábra: Egy fehér LED spektrumát két részre osztó automatikus eljárás eredménye: a narancs színű görbe a kék LED spektrumának felel meg, a zöld görbe a fényporból származó konvertált fény spektrumának felel meg.



17. ábra: A Split Pearson VII modell szerint számított a) kék fény és b) konvertált fény spektruma.

Záró beszámoló az NKFIH K_128315 sz. "LED öregedés új vizsgálati módszerei" című kutatási projektjéről

Projektünkhöz kötődik a dr. Harsányi Gáborral és munkatársaival folytatott együttműködésünk, amelynek során egyes, **általunk részletesen karakterizált LED minták HAST tesztje történt, kontrollált relatív páratartalom mellett. E vizsgálatok célja a páratartalom LED öregedésre gyakorolt hatásának részletes vizsgálata [C8]**. Hasonlóan a Padovai Egyetemmel folytatott közös öregítési vizsgálatokhoz, e tesztek kapcsán a pre- és post-stress karakterizálást tanszékünk Termikus és Megbízhatósági Laboratóriumában végeztük, a fent felsorolt egyetemi hallgatók bevonásával. A teszt eredmények részletes elemzése a projekt zárásakor még nem fejeződött be. További vizsgálatainkat nemzetközi partnereinkkel együttműködve, az AI-TWILIGHT projekt keretében folytatjuk.

Egyéb eredmények

Jelen projektünk számára terven felüli lehetőséget biztosított a BME Q épület 3. emeleti folyosóján telepített LED-es világítótestek váratlanul gyors degradációja kapcsán **az épület üzemeltetője számára végzett szakértői vizsgálat, amely módszereit tekintve a jelen projektben született eredményekre támaszkodott**. A meghibásodott világítótestekben található LED-ek vizsgálatáról beszámoltunk a MEE Világítástechnikai Társasága (VTT) XII. LED konferenciáján, amely online került megrendezésre. Az előadás kibővített anyagát magyarul a VTT 2020-2021-es Világítástechnikai Évkönyvében publikáltuk [B1]. E munka ismertetését tartalmazó angol nyelvű közleményünkkel szerepeltünk a 2021. évi 27. THERMINIC Workshop-on. Az online megtartott előadásunkhoz csatlakozó konferenciaközlemény IEEE közleményként jelent meg [C12].

Hegedüs János 2020.-ban benyújtott "Fénykibocsátó diódák multi-fizikai élettartam modellezése" című PhD disszertációját 2021. február 24.-én sikeresen megvédte. A disszertációban [D1] megfogalmazott tézisei szorosan kapcsolódtak jelen OTKA projektünkhöz.

Hantos Gusztáv 2020.-ban benyújtott "Measurement Techniques of Light Emitting Diodes" című PhD disszertációját 2022.06.17.-én sikeresen megvédte. A disszertációban [D2] megfogalmazott tézisei szorosan kapcsolódtak jelen OTKA projektünkhöz.

A Hantos Gusztáv által javasolt pontosított LED mérési eljárás (újfajta K-faktor kalibráció) a JEDEC LED termikus mérési szabványa 2022-ben publikált új kiadásában szereplő ajánlás alapját képezi [36].

Poppe András társ-szerkesztésével a **Springer kiadónál 2022-ben megjelent, a félvezetők termikus tranziens mérésének elméletével és gyakorlatával foglalkozó könyv [B2]**. Poppe András társszerzőségével írt **6. fejezete [B3] egységes szerkezetben ismerteti a LED-ek termikus mérési eljárását, tartalmazva a Hantos Gusztáv által javasolt új kalibrációs eljárást is**.

A projekthez kapcsolódik, hogy **Poppe András témavezető felkérést kapott a hollandiai Eindhovenben 2019. május 9-10-én megrendezett "Trends and Challenges in Reliability" c. workshopon egy 40 perces előadás megtartására "High Accuracy Testing" címmel**. Az előadás a jelen projektben elért részeredményeket is bemutatta, a BME Elektronikus Eszközök Tanszékén és a SIEMENS Mentor Graphics MicReD részlegénél folyó, megbízhatósági mérésekkel kapcsolatos K+F tevékenység kontextusában [E1].

Hegedüs János a BME 2019. évi PhD kutatói pályázatán a jelen projekthez kapcsolódó kutatási tervével 3. díjat nyert [E3].

Záró beszámoló az NKFIH K_128315 sz. "LED öregedés új vizsgálati módszerei" című kutatási projektjéről

A projekthez kapcsolódik, hogy 2020-ban Hegedüs János és Hantos Gusztáv közös, a Pro Progressio Alapítvány és az **Élet és Tudomány ismeretterjesztő folyóirat cikkpályázatára beadott "A LED-ekben rejlő lehetőségek: Okos fényforrások" c. pályamunkája, amely 1. díjat nyert [E4].**

2022. július 23.-án Poppe András keynote előadást tartott az SCEE-2022 (The 14th Conference on Scientific Computing in Electrical Engineering) konferencián Amszterdamban, "Creating new multi-domain digital twins of LEDs with an attempt to describe their ageing for predictive maintenance schemes" címmel [E5], amelyben magas szintű áttekintést adott a LED megbízhatósággal kapcsolatos K+F célokról és eredményekről.

A LED spektrumok modellezésével kapcsolatos munkákról Lipák Gyula TDK dolgozatot készített Hegedüs János és Hantos Gusztáv konzulensek irányításával, amellyel a BME VIK 2022. évi TDK konferenciáján 2. helyezést ért el [E6].

Hivatkozások

- [1] The website of the European R&D project Delphi4LED: <http://www.delphi4LED.eu/>
- [2] G. Martin, A. Poppe, S. Lungten, V. Heikkinen, J. Yu, M. Rencz, R. Bornoff, "Delphi4LED - From Measurements to Standardized Multi-Domain Compact Models of Light Emitting Diodes (LED)", *ELECTRONICS COOLING* 22:(12) pp. 20-23. (2016), <http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCS/Electronics-Cooling-December-2016-Delphi4LED.pdf>
- [3] Poppe A., "Delphi4LED - A mérésektől a LED-ek szabványos multi-domain kompakt modelljéig: szimulációs modellek fejlesztése a szilárdtest világítástechnikai ipar beszállítói láncának különböző szereplői számára", In: Világítástechnikai Évkönyv 2016-2017: LED-jen FÉNY!, 272 p., Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2017. pp. 94-101. (in Hungarian), <http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCS/Vilagitastechnikai-Evkonyv-2016-2017-Delphi4LED.pdf>
- [4] JEDEC JESD51-51 Standard, "Implementation of the Electrical Test Method for the Measurement of Real Thermal Resistance and Impedance of Light-Emitting Diodes with Exposed Cooling" (2012), <https://www.jedec.org/system/files/docs/JESD51-51.pdf>
- [5] JEDEC JESD51-52 Standard, "Guidelines for Combining CIE 127:2007 Total Flux Measurements with Thermal Measurements of LEDs with Exposed Cooling Surface" (2012), <https://www.jedec.org/system/files/docs/JESD51-52.pdf>
- [6] CIE 127:2077 Technical Report, "Measurement of LEDs", ISBN 978-3-901906-58-9, <https://cie.co.at/publications/measurement-leds>
- [7] CIE 225:2017 Technical Report, "Optical Measurement of High-Power LEDs", ISBN 978-3-902842-12-1, <http://dx.doi.org/10.25039/TR.225.2017>
- [8] A. Poppe, "A step forward in multi-domain modeling of power LEDs", In: Proc. of the 28th IEEE SEMI-THERM Symp., 18-22 March 2012, San Jose, USA, pp. 325-330, <http://dx.doi.org/10.1109/STHERM.2012.6188868>
- [9] A. Poppe, "Multi-domain compact modeling of LEDs: an overview of models and experimental data", *MICROELECTRONICS JOURNAL* 46(12 A): 1138-1151. (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.mejo.2015.09.013>
- [10] Poppe A., Szalai A., Hegedüs J., "LED-ek multi-domain szimulációs modelljei és azok gyakorlati vonatkozásai", In: Németh Z., Nagy B. V. (szerk.), Világítástechnikai Évkönyv 2014-2015: Fények és tények, 208 p., Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2015. pp. 112-121. (in Hungarian), http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCS/VTT-Evkonyv2015-LED_modellezes.pdf
- [11] A. Poppe, G. Farkas, V. Székely, Gy. Horváth, M. Rencz, "Multi-domain simulation and measurement of power LED-s and power LED assemblies", In: Proc. of the 22nd IEEE SEMI-THERM Symp., 14-16 March 2006, Dallas, USA, pp. 191-198, <http://dx.doi.org/10.1109/STHERM.2006.1625227>
- [12] A. Poppe, J. Hegedüs, A. Szalai, R. Bornoff, J. Dyson, "Creating multi-port thermal network models of LED luminaires for application in system level multi-domain simulation using SPICE-like solvers", In: Proc. of the 32nd IEEE SEMI-THERM Symp., 14-17 March 2016, San Jose, USA, pp. 44-49, <http://dx.doi.org/10.1109/SEMI-THERM.2016.7458444>

- [13] A. Poppe, "Simulation of LED Based Luminaires by Using Multi-Domain Compact Models of LEDs and Compact Thermal Models of their Thermal Environment", *MICROELECTRONICS RELIABILITY* 72(5): 65-74 (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2017.03.039>
- [14] C. J M Lasance, A. Poppe (eds.), "Thermal Management for LED Applications", (Solid State Lighting Technology and Application Series, Vol. 2), Springer, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-5091-7>
- [15] Hegedüs J., Poppe A., "Közvilágítási lámpatestek karakterizálása multi-domain LED modellekkel – a LED karakterisztikáktól a lámpatest üzemi fényáramáig", *ELEKTROTECHNIKA* 110(3-4): 13-20. (2017), (in Hungarian) <http://www.mee.hu/files/files/et-2017-03-04.pdf#page=13>
- [16] J. Hegedüs, G. Hantos, A. Poppe, "Light output stabilisation of LED based streetlighting luminaires by adaptive current control", *MICROELECTRONICS RELIABILITY* 79(12): 448-456 (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2017.06.060>
- [17] J. Hegedüs, P. Hotváth, T. Szabó, A. Szalai, A. Poppe, "A New Dimming Control Scheme of LED Streetlighting Luminaires Based on Multi-Domain Simulation models of LEDs in order to Achieve Constant Luminous Flux at Different Ambient Temperatures", In: Proc. of the Conference on "Smarter Lighting for Better Life" at the CIE Midterm Meeting 2017, 23-25 October 2017, Jeju, South Korea, CIE x044:2017, pp. 267-276., http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/CIE2017-Midterm-OP37_Hegedus-et-al_A_new_dimming_Final.pdf
- [18] J. Hegedüs, P. Horváth, G. Hantos, T. Szabó, A. Szalai, A. Poppe, "A New Dimming Control Scheme of LED Based Streetlighting Luminaires Using an Embedded LED Model Implemented on an IoT Platform to Achieve Constant Luminous Flux at Different Ambient Temperatures", Proc. of Lux Europa 2017, 18-20 September 2017, Ljubljana,
- [19] A. Poppe, G. Hantos, G. Farkas, F. Szabó, J. Joly, J. Thomé, J. Yu, K. Bosschaertl, E. Juntunen, E. Vaumorin, A. di Buccianico, Th. Merelle, "Inter Laboratory Comparison of LED Measurements Aimed as Input for Multi-Domain Compact Model Development within the Del-phi4LED H2020 Project", In: Proc. of Lux Europa 2017, 18-20 September 2017, Ljubljana, Slovenia, pp. 304-309, http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/LuxEoropa2017-ID37_Poppe_final_v2.pdf
- [20] A. Poppe, G. Farkas, F. Szabó, J. Joly, J. Thomé, J. Yu, K. Bosschaertl, E. Juntunen, E. Vaumorin, A. di Buccianico, T. Merelle, "Inter Laboratory Comparison of LED Measurements Aimed as Input for Multi-Domain Compact Model Development within a European-wide R&D Project", In: Proc. of the Conference on "Smarter Lighting for Better Life" at the CIE Midterm Meeting 2017, 23-25 October 2017, Jeju, South Korea, CIE x044:2017, pp. 569-579, http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/CIE2017-Midterm-PP16-Poppe_et_al_Interlaboratory-final.pdf
- [21] J. Hegedüs, G. Hantos, A. Poppe, "Lifetime Iso-flux Control of LED based Light Sources", In: Proc. of the 23rd International Workshop on THERMal Investigation of ICs and Systems (THERMINIC'17), 27-29 September 2017, Amsterdam, The Netherlands, Paper Paper_181, <http://dx.doi.org/10.1109/THERMINIC.2017.8233816>
- [22] IESNA LM-80-08 standard, "IES Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources", Illuminating Engineering Society, New York, 2008
- [23] The website of the European R&D project NANOTHERM FW7 ICT project: <http://project-nanotherm.com/>
- [24] IESNA TM-21-11 technical memorandum, "Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources", Illuminating Engineering Society, New York, 2011
- [25] A. Poppe, G. Molnár, P. Csuti, F. Szabó, J. Schanda, "Ageing of LEDs: A Comprehensive Study Based on the LM80 Standard and Thermal Transient Measurements", In: CIE 27th Session-Proceedings, CIE 197:2011: (Volume 1), Sun City, South Africa, 10-15 July 2011, pp. 467-477, <https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/4251>
- [26] A. Szél, Z. Sárkány, M. Bein, R. Bornoff, A. Vass-Várnai, M. Rencz, "Lifetime estimation of power electronics modules considering the target application", In: Proc. of the 31st IEEE SEMI-THERM Symp., 15-19 March 2015, San Jose, USA, pp. 332-335, <http://dx.doi.org/10.1109/SEMI-THERM.2015.7100183>
- [27] A. Szél, Z. Sárkány, M. Bein, R. Bornoff, A. Vass-Várnai, M. Rencz, "Mission Profile Driven Component Design for Adjusting Product Lifetime on System Level", In: Proc. of the International Conference on Electronics Packaging (ICEP), 14-17 April 2015, Kyoto, Japan, pp. 385-389, <http://dx.doi.org/10.1109/ICEP-IAAC.2015.7111041>

- [28] G. Hantos, J. Hegedüs, M. Rencz, A. Poppe, "Aging Tendencies of Power LEDs Under Different Stress Conditions During Thermal Reliability Testing", In: Proc. of the 21st International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'15), 30 September - 2 October 2015, Paris, France, Paper 6_4_id152, <http://dx.doi.org/10.1109/THERMINIC.2015.7389624>
- [29] G. Hantos, L. Juhász, M. Rencz, "In Situ Thermal Reliability Testing Methodology for Novel Thermal Interface Materials", In: Proc. of the 20th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'14), 24-26 September 2014, London, United Kingdom, Paper 1010, <http://doi.org/10.1109/THERMINIC.2014.6972532>
- [30] K. Paisnik, A. Poppe, T. Rang, G. Rang, "Physics related modeling of Power LEDs", In: Proc. of the 13th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC'12), 3-5 October 2012, Tallinn, Estonia, pp. 57-60, <http://dx.doi.org/10.1109/BEC.2012.6376814>
- [31] E. Ikonen, A. Vaskuri, H. Baumgartner, T. Pulli, T. Poikonen, O. Kantamaa, P. Kärhä, "Online measurement of LED junction temperature for lifetime prediction", Abstracts booklet of the CIE Conference on "Smarter Lighting for Better Life" at the CIE Midterm Meeting 2017, 23-25 October 2017, Jeju, South Korea, pp. 36-37
- [32] The website of the European R&D project AI-TWILIGHT: <https://ai-twilight.eu/>
- [33] A CIE TC 2-91 műszaki bizottság tevékenységi köre: <https://cie.co.at/technicalcommittees/optical-measurement-methods-led-packages-and-led-arrays>
- [34] Arnold Wilkins: Darwin versus visual discomfort (Darwin és a vizuális zavaró hatások viszonya), Világítástechnikai Évkönyv 2018-2019, MEE Világítástechnikai Társasága, Budapest, 2019, pp. 4-19, <https://vilagitas.org/stuff/evkonyv/2018-2019/MEEVTT-evkonyv-2018-2019.pdf>
- [35] Frank REIFEGERSTE; Jens LIENIG; "Modelling of the Temperature and Current Dependence of LED Spectra", Journal of Light & Visual Environment 32(3): 288-294,2008, <https://doi.org/10.2150/jlve.32.288>, https://www.istage.jst.go.jp/article/jlve/32/3/32_3_288/article/-char/en
- [36] JEDEC JESD51-51A Standard, "Implementation of the Electrical Test Method for the Measurement of Real Thermal Resistance and Impedance of Light-Emitting Diodes with Exposed Cooling" (2022), <https://www.jedec.org/system/files/docs/JESD51-51A.pdf>
- [37] A. Vulli; G. Schlottig; M. Orkisz; M. Firlac; E. Bianda;"A model-based approach for prognostics of power semiconductor modules", In: Proceedings of The 25th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2023, 4-8 September 2023, Aalborg, Denmark, accepted, in press

A projekthez kapcsolódó publikációk

Folyóirat cikkek

- [J1] Poppe, A. ; Farkas, G. ; Gaál, L. ; Hantos, G. ; Hegedüs, J. ; Rencz, M.; "Multi-Domain Modelling of LEDs for Supporting Virtual Prototyping of Luminaires", *ENERGIES* 12(10): 1909, 2019, <https://doi.org/10.3390/en12101909>
- [J2] Pohl, L.; Hantos, G.; Hegedüs, J.; Németh, M.; Kohári, Zs.; Poppe, A.; "Mixed Detailed and Compact Multi-Domain Modeling to Describe CoB LEDs", *ENERGIES* 13(16): 4051, 2020, <https://doi.org/10.3390/en13164051>
- [J3] Hegedüs, J.; Hantos, G.; Poppe, A.; "Lifetime Modelling Issues of Power Light Emitting Diodes", *ENERGIES* 13(13): 3370, 2020, <https://doi.org/10.3390/en13133370>
- [J4] J. Hegedüs; G. Hantos; M. Lukács; B. Bodnár; G. Lipák, A. Poppe; "Lifetime test of pulse width modulated LEDs supplemented with thermal investigations", *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* (Early Access), 2023, <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2023.3278101>
- [J5] Lipák Gyula; Hegedüs János; Hantos Gusztáv; "A LED-ek segítségével előállított fehér fény", *Elektrotechnika* 116(5-6): 42-47, 2023, <https://www.mee.hu/files/files/ssd2/et-2023-7-8.pdf>

Konferenciaközlemények

- [C1] J., Hegedüs ; G., Hantos ; A., Poppe; "A step forward in lifetime multi-domain modelling of power LEDs", In: Proceedings of the 29th Session of the CIE, Vienna, Ausztria : International Commission on Illumination (CIE), pp. 1154-1161. , 8 p., 2019, <https://doi.org/10.25039/x46.2019.PO074>
- [C2] J., Hegedüs ; G., Hantos ; A., Poppe; "Reliability Issues of Mid-Power LEDs", In: Proceedings of the 25th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems / IEEE Xplore; <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/8911538/proceeding>, 2019, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2019.8923802>
- [C3] J., Hegedüs ; G., Hantos ; M., Németh ; L., Pohl ; Zs., Kohári ; A., Poppe; "Multi-domain characterization of CoB LEDs", In: Proceedings of the 29th Session of the CIE, Vienna, Ausztria : International Commission on Illumination (CIE), pp. 387-397., 2019, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2019.8923802>
- [C4] Pohl, L.; Németh, M.; Hegedüs, J.; Hantos, G.; Kohári, Zs.; Poppe, A; "Multi Domain Modelling and Simulation of White CoB LEDs", In: Proceedings of the 25th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems / IEEE Xplore; <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/8911538/proceeding>, 2019, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2019.8923856>
- [C5] Poppe, András ; Hegedüs, János ; Hantos, Gusztáv ; Csuti, Péter ; Rencz, Márta; "Concepts for High throughput LED Testing and High-speed Optical Transients of LEDs", In: Proceedings of the 28th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems / IEEE Xplore; <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9950458/proceeding>, 2022, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC57263.2022.9950671>
- [C6] András Poppe; Gusztáv Hantos; János Hegedüs; Ferenc Ender; "IMPLEMENTATION OF A HIGH-SPEED LED CHARACTERISATION SYSTEM", In: Proceedings of the CIE 2023 Conference "Innovative Lighting Technologies" at the 30th Quadrennial Session of the CIE, 18-20 September 2023 (accepted), 2023
- [C7] András Poppe; Gusztáv Hantos; János Hegedüs; Ferenc Ender; "An automated method for creating compact dynamic thermal models for in-situ prognostics of power electronics and power LED packages", In: Proceedings of the 29th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems, 27-29 September 2023, accepted
- [C8] Hegedüs, János ; Hantos, Gusztáv ; Poppe, András ; Lukács, Máté ; Bodnár, Bence; "The Effect of Dimming Frequency on the Aging of Power LEDs", In: Proceedings of the 28th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems / IEEE Xplore; <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9950458/proceeding>, 2022, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC57263.2022.9950630>
- [C9] Hegedüs, János ; Hantos, Gusztáv ; Poppe, András ; Lukács, Máté ; Bodnár, Bence ; Lipák, Gyula; "Thermal characterization issues of LEDs during reliability testing", In: Proceedings of the 28th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems / IEEE Xplore; <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9950458/proceeding>, 2022, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC57263.2022.9950652>
- [C10] János Hegedüs; Gusztáv Hantos; András Poppe; Róbert Kovács; Péter Bojta; Gábor Harsányi; "LED LIFETIME TESTS FOR CIRCUIT SIMULATION MODELLING", In: Proceedings of the CIE 2023 Conference "Innovative Lighting Technologies" at the 30th Quadrennial Session of the CIE, 18-20 September 2023 (accepted), 2023
- [C11] Gyula Lipák; Dalma Takács; János Hegedüs; Gusztáv Hantos; "MODELLING THE SPECTRAL POWER DISTRIBUTION OF MONOCHROMATIC AND PHOSPHOR-CONVERTED POWER LEDs", In:

Proceedings of the CIE 2023 Conference "Innovative Lighting Technologies" at the 30th Quadrennial Session of the CIE, 18-20 September 2023 (accepted), 2023

- [C12] János, Hegedüs; Gusztáv, Hantos ; Péter, Gábor Szabó ; András, Poppe; "Rapid Failure Analysis of Installed LED Luminaire Through Standardized Processes", In: Proceedings of the 27th International Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Systems / IEEEExplore; <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9626389/proceeding>, 2021, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC52472.2021.9626528>

Disszertációk

- [D1] Hegedüs János: Fénykibocsátó diódák multi-fizikai élettartam modellezése, Műegyetemi Digitális Archívum, <https://repositorium.omikk.bme.hu/handle/10890/15129>, 2021
- [D2] Hantos Gusztáv: Measurement techniques of light emitting diodes, Műegyetemi Digitális Archívum, <https://repositorium.omikk.bme.hu/handle/10890/17001>, 2022

Könyvek, könyvrészek

- [B1] Hegedüs, János ; Hantos, Gusztáv ; Szabó, Péter Gábor ; Poppe, András: Egy világításkorszerűsítési projekt megbízhatósági problémái, Világítástechnikai Évkönyv 2020-2021, Magyar Elektrotechnikai Egyesület Világítástechnikai Társaság (2022) 167 p. pp. 74-88, 2022, <https://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/Vilagitastechnikai-Evkonyv-2020-2021-LEDmegbizhatosag.pdf>
- [B2] M. Rencz, G. Farkas, A. Poppe (eds): Theory and Practice of Thermal Transient Testing of Electronic Components, Springer, 2022, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-86174-2>
- [B3] G. Farkas, A. Poppe, Z. Sárkány, A. Vass-Várnai: Thermal Transient Measurements on Various Electronic Components, In: M. Rencz, G. Farkas, A. Poppe (eds), Theory and Practice of Thermal Transient Testing of Electronic Components, Springer (2022), pp. 209-318, 2022, https://doi.org/10.1007/978-3-030-86174-2_6

Egyéb eredmények referenciái

- [E1] Spice multi-domain LED modell paraméter identifikáló eszköz: <https://extractor.ai-twilight.org/>
- [E2] A.Poppe, G. Hantos, J. Hegedüs: High Accuracy Testing, Invited talk at the "Trends and Challenges in Reliability" workshop, 9-10 May 2019, Eindhoven, The Netherlands, 2019
- [E3] Hegedüs János 2019. évi BMe Kutatói Pályázatán 3. díjat nyert kutatási terve: http://doktori.bme.hu/bme_palyazat/2019/honlap/hegedus_janos_hu.htm
- [E4] Hegedüs, János ; Hantos, Gusztáv: A LED-ekben rejlő lehetőségek: Okos fényforrások, ÉLET ÉS TUDOMÁNY LXXV. : 28. pp. 878-880., 2020, https://www.bme.hu/hirek/20200703/Oktatok_es_hallgatok_ismeretterjeszto_irasait_dijaztak_a_muelyetemi_cikkpalyazaton
- [E5] Poppe András: Creating new multi-domain digital twins of LEDs with an attempt to describe their ageing for predictive maintenance schemes, Kyenote előadás, The 14th Conference on Scientific Computing in Electrical Engineering / <https://scee-conferences.org/pages/2022-schedule-detailed>, 2022, <https://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/SCEE-2022-AP-ack.pdf>
- [E6] Lipák Gyula TDK dolgozata: <https://tdk.bme.hu/VIK/eleszk2/LEDek-segitsegevel-eloallitott-feher-feny>, ill. <https://tdk.bme.hu/Browse/Papers?y=2022&f=VIK&d=EET&su=Hegedus-Janos-Dr>

Final report of the NKFIH K_128315 research project “New methods for investigating LED ageing”

Principal investigator:

prof. András Poppe DSc, head of department (BME Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Department of Electron Devices)

Project period:

2018.09.01-2023.03.31 (3 years + extension due to the COVID-19 pandemic)

Table of contents:

Principal investigator:.....	1
Project period:	1
Summary of the research results	2
The background and the goals of the project	2
Overview of the achieved results.....	4
Exploitability of the project results.....	5
Deviations from the grant agreement	6
Details of the research results	6
Other results	21
References.....	22
Publications related to the project	24
Journal papers.....	24
Publications in conference proceedings	24
Dissertations	26
Books, book chapters.....	26
References to other project results	26

Summary of the research results

The background and the goals of the project

Our present project aimed to address the above quality issue from the point of view of the physical realization of components, through a new aspect related to the prediction of the reliability / lifetime of LEDs and LED applications. Product quality is thought to be a differentiator of European SSL products (LED packages, modules, retrofit bulbs or complete LED based luminaire) when compared to Asian ones flooding European markets at very low prices. This was also among the main motivations behind the currently running Delphi4LED H2020 ECSEL project [1], [2], [3], which aims to address the quality issue from the perspective of product *design*. The key aspect is to address the strongly temperature dependent, multi-physics nature of LED operation with appropriate multi-domain LED compact models. These models are based on data obtained from measurements compliant to the latest LED thermal testing standards and recommendations related to LED thermal and optical properties [4], [5], [6], [7]**Error! Reference source not found.**. The concept of the Delphi4LED project is that a chip level multi-domain LED model [8], [9], [10] completed with the compact thermal models of the LED package [11] and the thermal model of the wider environment allows proper hot lumens predictions of a complete LED application such as a luminaire [12], [13]. Using such computer models the proper thermal management of the LED application [14] can be elaborated without the need of any physical prototyping while through hot lumen calculations it can be also checked, if a given design meets the lighting specifications [15]. Furthermore, complex lighting control schemes assuring ambient temperature independent constant light output operation of the luminaires can also be elaborated with such model [16], [17], [18].

The major drawback of the Delphi4LED models is that they refer to “fresh” LEDs with 0 h of operation, as sold by the LED manufacturers and contain no information about LED operation at a given time instant of the operation time of the LED based product. As revealed by the international round-robin testing of different LEDs (coordinated by our LED testing laboratory at BME) [19], [20] even after 500 h of burn-in aimed at bypassing the early, instable operation of LEDs, continuous drift (mostly degradation) of the light output has been observed. *This has raised the question how lumen depreciation during the useful lifetime of LEDs could be modelled and how such models could be included in the present multi-domain models of LEDs?* The feasibility of answering this question has been elaborated in a prior publication [21] where the possibility of lifetime iso-flux control of LEDs under application conditions was analysed based on data gained during a 10000 h LM-80 standard [22] compliant ageing test of white LEDs which was performed in the framework of the NANOTHERM EU FW7 project [23].

LED ageing conditions worldwide used by the SSL industry in lifetime tests of LEDs are defined in the IES LM-80 standard [22]. These require constant DC forward current driving of the LEDs under test in an isothermal environment at elevated temperature, typically at 85 °C. The major ageing indicator of the LEDs subject to aging is the lumen maintenance or lumen depreciation (precisely: the degradation of the emitted total luminous flux). For lifetime estimations for a given LED population, at least 6000 h of elapsed ageing time is necessary, the usual industrial practice is 10000 h of ageing. The expected LED product lifetime with given end-of-life criteria is determined by extrapolation from the measured LM-80 lumen maintenance data using the recommendations of the IES TM-21 technical memorandum [24]. One has to

point out that these usual LED lifetime tests are quasi real-time tests (with the LM-80 stress conditions no acceleration factor is applied), therefore they are very lengthy; furthermore, the cca. 10000 h of constant DC current driving at 85 °C as stress conditions approximate the real-life operating conditions of the LEDs roughly only.

Therefore, e.g. in order to allow the design of the control of an actual LED application (as mentioned above) assuring constant light output throughout the entire expected product lifetime, such novel ageing modes are required which better approximate the real-life operating conditions (also known as the mission-profile) of the LEDs.

Therefore, beyond lumen maintenance, investigation and modelling of additional ageing indicators is important. As already suggested in a study of a prior ageing test [25] such is the degradation of the physical structure of LED package indicated by the increased thermal resistance (of the die attach) of the LED package (see Figure 1b).

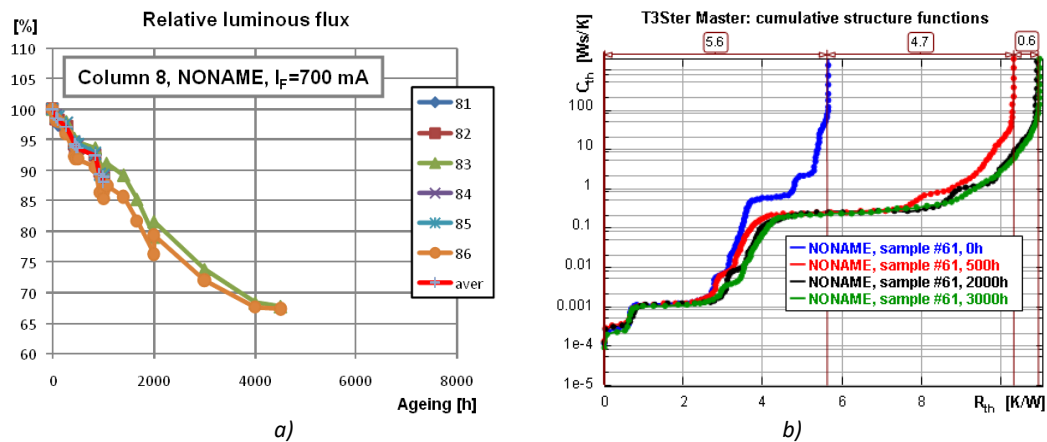


Figure 1: LED aging observed a) through lumen maintenance, b) through the structure function as a new, additional aging indicator [25].

Our project had the following major goals and hypothesis:

Our fundamental goal was to gain a deeper understanding of LED ageing and investigation of ageing indicators beyond the bare luminous flux maintenance; the ability to model the temporal changes of these indicators, possible through multi-domain models aimed at Spice-like simulations in order to allow designers to obtain information at any instance of the predicted lifetime of their LED-based products within the product design/development workflow. Regarding this we had the following assumptions/hypothesis:

- Standard LED ageing conditions defined by a constant forward current and ambient temperature (see [22]) can be completed with appropriately chosen power, temperature and humidity cycles that provide a better approximation of the actual mission profiles of LED-based luminaires.
- We assumed that besides the thermally assisted failure modes these additional aging conditions active such failure modes that are not affected by the LM-80 ageing conditions.
- We assumed that these failure modes can also be associated with ageing indicators that have not yet been used but their changes can be measured and tracked with usual LED test equipment (including e.g. isothermal IVL characteristics, thermal impedance curves, spectra).
- It was already proven that structure functions derived from the measured thermal impedance curves are proper ageing indicators of the degradation of thermal interfaces within an LED package (see [25] and chapter 4 of [14]).

- We assumed, that the *parameters of a Spice-compatible multi-domain LED model* [8], [9], [10] such as the saturation current, ideality factor or the electrical series resistance can also be used as ageing indicators and perhaps can be associated with different failure modes.
- We assume that through properly designed test plans and corresponding measurements sufficient information can be gained to track the temporal changes (ageing time dependence) of these parameters and these changes could be modelled and implemented in a Spice-like multi-domain simulation model.
- LED spectra depend also on the band structure of the semiconductor material used and these spectra can also be modelled [30] and the parameters of these models are also suitable for LED lifetime predictions [31].

Overview of the achieved results

During the project the following technical and scientific results were achieved:

- We created a Spice-like chip level multi-domain LED model that can fit into an Industry 4.0 like product development workflow [J1]. In its practical realization the model has been reformulated from the usual voltage-driven form to a current-driven version that was beneficial both from the point of view of the equation level and Spice circuit macro implementation by having excellent convergence properties; allowing its usage both within a Spice circuit simulation environment or for the simulation of LED chips embedded into a physical environment represented by a complex 3D numerical model [J2], [C3], [C4].
- In the practical realization of the above model, the characteristics of the temperature controlled sources (that describe the electro-thermal phenomena of the LED chip) stem from a refined LED characterization process (yielding the so-called K-factor functions) [D2]. The refined new LED characterization (new process for K-factor calibration) is the basis of the update of JEDEC’s latest LED thermal testing standard published in 2022. This new calibration method was also published in one of the chapters[B3] of our recent book [B2] published by Springer.
- We confirmed our hypothesis regarding the ageing time dependence of the parameters of our chip level Spice-like multi-domain model and we also confirmed that these parameters can also be considered as age indicators. These parameters are monotonous functions of the ageing time and can be well approximated by simple analytic formulae [J3], [C1], [C2]. The ageing time dependent multi-domain is suitable for precisely describing the luminous flux maintenance properties of LEDs measured under standard lifetime testing conditions.
- Based on the above method of modelling the nominal aging of LEDs [J3] we proposed the concept of the “lifetime budget” [D1], that could be the basis of the lifetime prediction of LEDs according to their actual mission profiles. (The tests for finding the actual acceleration factors according to different forward currents and operating temperatures have been completed yet at the closure of the project.)
- The assumption that the structural degradation (ageing) of the heat-flow path of packages of LEDs subject to applications with PWM-based dimming depends on the dimming frequency was confirmed through our test designed and performed to investigate such use-cases [J4], [C8]. In case of PWM frequencies below 1 kHz the changes of the obtained structure functions hinted the delamination of the die attach layer. The most pronounced ageing effect was found at a dimming frequency of 313 Hz. We also found that dimming frequencies above 10 kHz had no significant effect on the mechanical degradation of LED packages [J4], [C8].
- In cooperation with the team of prof. Gábor Harsányi, HAST tests have been performed that confirmed that high relative humidity significantly speeds up the ageing LEDs, through different concurrent failure mechanisms [C10]. These tests are still in progress at the closure of the project, including the identification and modelling of the failure mechanisms in question.
- We developed the concepts of a new test procedure aimed by improving the throughput of the combined thermal and radiometri/photometric tests by an order of magnitude [C5], [C6], [C7]. The practical realization of the test procedure is still in progress.
- Aimed for the new multi-domain LED model published in [J1] a new, web-based parameter identification procedure was worked out and implemented [E1]. This procedure does not require the LED characteristics be

measured at pre-specified values of the LEDs’ junction temperatures, this way contributing to the speed-up of the overall LED characterization procedure (see the item above).

- We proposed an automated method for the identification of the element values of an ageing time dependent compact thermal model of LED packages obtained from structure functions [C7].
- A method was developed for the accurate experimental study of the spectral power distributions of the pairs of LEDs with blue chip only and white LEDs with the same kind of blue chips (custom preparation of LED samples with controlled, known properties) [J2], [C3], [C4], which allows the separation of the spectra of the primary blue emission and the secondary emission on longer wavelengthsh converted from the primary blue emission [C11]. This allows the modelling of spectra of monochromatic LEDs (besides blue ones, red and green LEDs as well) and spectra of phosphor converted white LEDs [C11].
- We identified and modelled the operation point (forward current, temperature) dependence of the spectra. We also defined different accuracy metrics to measure the quality of the spectrum models [J5], [C11], [E6], through which we qualified different models published in the literature as well as our own models of operating point dependence that are based on a 3rd order polynomial approximation. Until the closure of the present project, aged spectra have not been studied yet. These studies will be continued within the AI-TWILIGHT H2020 ECSEL project.

The project results were documented in **four journal papers papers** ([J1]-[J4]) out of which 3 are open access, **one peer-reviewed Hungarian journal paper** [J5], **12 conference papers published in proceedings of international conferences** ([C1]-[C12]), and **2 PhD dissertations** (János Hegedüs, Gusztáv Hantos [D1], [D2]). On top of this, **a book** [B2] and **two book chapters** [B1], [B3], **two invited/keynote talks** [E2], [E5], **a popular scientific paper** [E4], **a doctoral student award** [E3] and **a graduate students’ scientific conference award** [E6] are also closely related to this project. As a result of this project, a close cooperation with the reliability research team of the Padova University, headed by prof. **M. Meneghini** was established.

Exploitability of the project results

The base ideas and concepts of this project lead to the development the workplan and proposal, eventually to the **H2020 ECSEL project AI-TIWILIGHT** that has the modelling of LED ageing in its focus, aimed both for the SSL product development process and **for setting up predictive maintenance schemes of different types of luminaires through the application of their digital twins used during operation**. Key to these predictive maintenance schemes is the **mission-profile dependent prediction of the expected remaining useful lifetime** (RUL) of the luminaires, for which we hope, that our ageing-time dependent multi-domain LED model [J3] would be the right basis.

The next **project results with high industrial relevance** is our **new model parameter identification tool and its web-based user interface available on the internet** [E1] and the new **multi-domain LED characterization procedure** [C5]-[C7] that offers about an order of magnitude higher throughput than the one based on today’s LED testing standards. The first one can be commercially exploited as a service, while the second one, with its concepts aligned with the work of CIE’s TC2-91 technical committee [33] and the expected future LED testing standards allows the development of a new, flexible measurement control software. The commercial exploitation such a software tool is viable only after the publication of the new LED testing standard that the CIE TC2-91 technical committee is working on.

Deviations from the grant agreement

Due to the restrictions resulting from the COVID-19 pandemic (in effect from 2020.03.10 at BME) our planned laboratory measurements suffered significant delays. In 2020 and 2021 the participation at international conferences was not possible. The very first conference where our physical presence was possible was the 28th THERMINIC Workshop, held in September 2022 in Dublin, Ireland.

Eventually, due to the COVID-19 emergency situation was approved for 1,5 years extension, with an unchanged overall budget, with a completion date of 31 March 2023.

The researchers who joined the project proposal performed the project; during the project, two of them obtained their PhD degrees, mostly based on the results obtained within the project.

We planned to employ graduate students in the project, which, due to the COVID-19 pandemic suffered delays, therefore, we could have part-time employment contract with university students only after the COVID-19 restrictions were lifted.

In terms of technical-scientific objectives there was no deviation from the approved workplan of the project, but details of the planned test differed from the ones foreseen in the project proposal, e.g. instead partial flux measurement tube, the total radiant/luminous fluxes of LEDs were measured in an integrating sphere, allowing us to avoid some optical calibration issues. We planned to measure the LEDs’ optical properties in a classical way (in compliance with the JEDEC JESD 51-51 and 51-52 standards [4], [5] and in compliance with the recommendations of the CIE CIE 127:200 and 225:2017 technical reports [6], [7]), under steady-state conditions that required very long testing time. In order to reduce the necessary testing time, aligned with the work of the approach of the CIE TC2-91 technical committee, we started working out a new LED testing protocol. Its major novelty (with respect to the present LED testing standards) is that the multiple LED samples are placed in the same test environment, the optical properties of which are measured with a series of short forward current pulses while the thermal properties of multiple DUT LEDs can be measured simultaneously, allowing about a 10x speed-up of the entire characterization procedure of for the given LED population.

The original objectives of the project included the modelling of LED spectra as possible ageing indicators. This activity was launched only in the last periods of the project; therefore, we could deal with the LED spectrum modelling issues, without using aged LED spectra. This activity (ie. obtaining aged LED spectra) is continued in an international collaboration in the framework of the AI-TWILIGHT project.

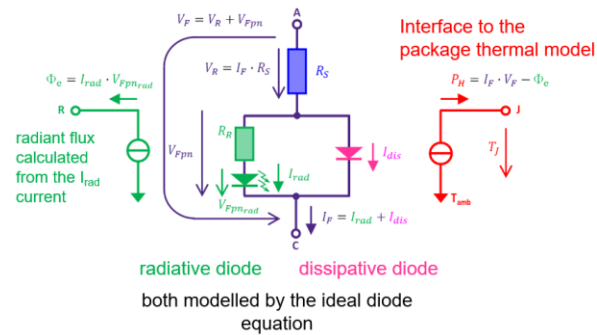
Details of the research results

As a start of our activities in the first project year, related also to the finishing Delphi4LED H2020 ECSEL project [1], **we have upgraded our chip level multi-domain LED model (Figure 2) the parameters of which seem to be used as new ageing indicators of LEDs.** The results of this activity are published in an open access journal paper [J1].

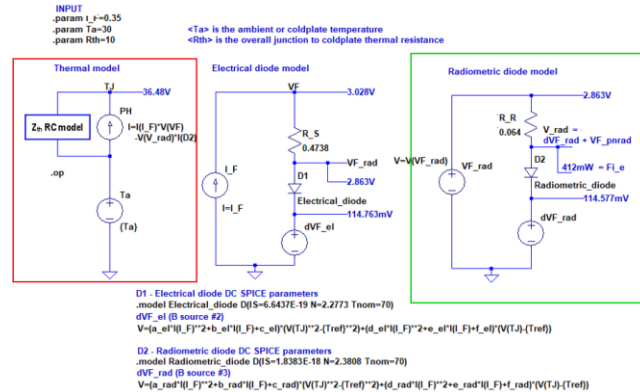
Matched to this model, a parameter identification Excel application was prepared (which, with a new, advanced algorithm was turned into a web-based application that we made available for the AI-TWILIGHT project partners). This tool has been applied to the archived isothermal IVL characteristics measured at five different instances during a 5000 h long, LM80 compliant ageing test, resulting in parameter sets corresponding to the five different ageing times. The parameter sets obtained this way

confirmed our hypothesis: **the model parameters, indeed, monotonically depend on the ageing time.** We could see in these initial data, that in the first 1000 and 2000 hours of ageing drastic changes happen, followed later by a slower drift with less steep gradient. These results have been reported at the 29th quadrennial session of CIE (International Commission on Illumination) in June 2019, in Washington DC, USA. This conference publication [C1] is an open access one.

The principle of the model:



The generic Spice circuit macro implementation:



a)

b)

Figure 2: The renewed chip level multi-domain LED model: a) the theoretical schematic, b) practical realization as Spice circuit macro (presented as an LT Spice schematic).

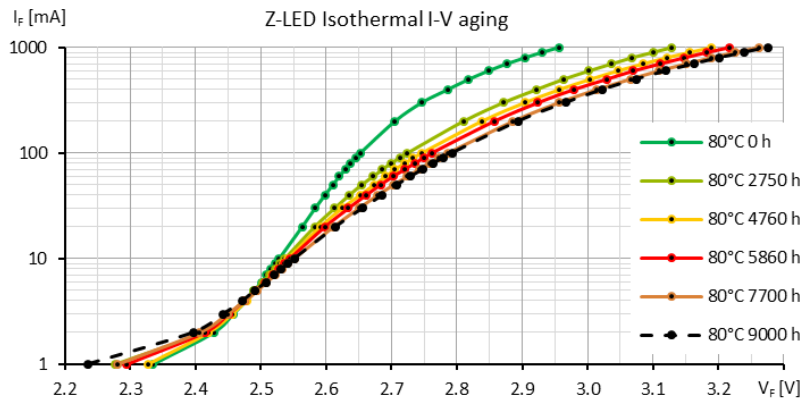


Figure 3: Electrical characteristics of LEDs aged under the conditions of the LM-80 standard [22].

The LM-80 standard prescribes a given ageing time (typically 10000 hours). Our experience is – at least from the point of view of modelling – that it is better to let the LEDs age until their luminous flux shrinks to a certain, pre-defined value. In this experiment we aged mid-power LEDs (Figure 3). The multi-domain parameter sets identified from these experimental data exhibit pronounced trends, **allowing us to propose approximate relationships for the description of their ageing time dependence.** These formulae allowed to include and consider the ageing time as an input variable for our multi-domain LED model (Figure 4). The radiometric flux calculated with this ageing dependent multi-domain model properly matches the measurement flux (Figure 5). These results have been reported as an oral presentation and a proceedings paper [C2] at the 25th THERMINIC Workshop, held on 25-27 September 2019 in Lecco, Italy.

$$V_{F,T_J=T_{ref}} = I_F \cdot R_S + m \cdot U_T \cdot \ln \left[\left(\frac{I_F}{I_0} \right) + 1 \right]$$

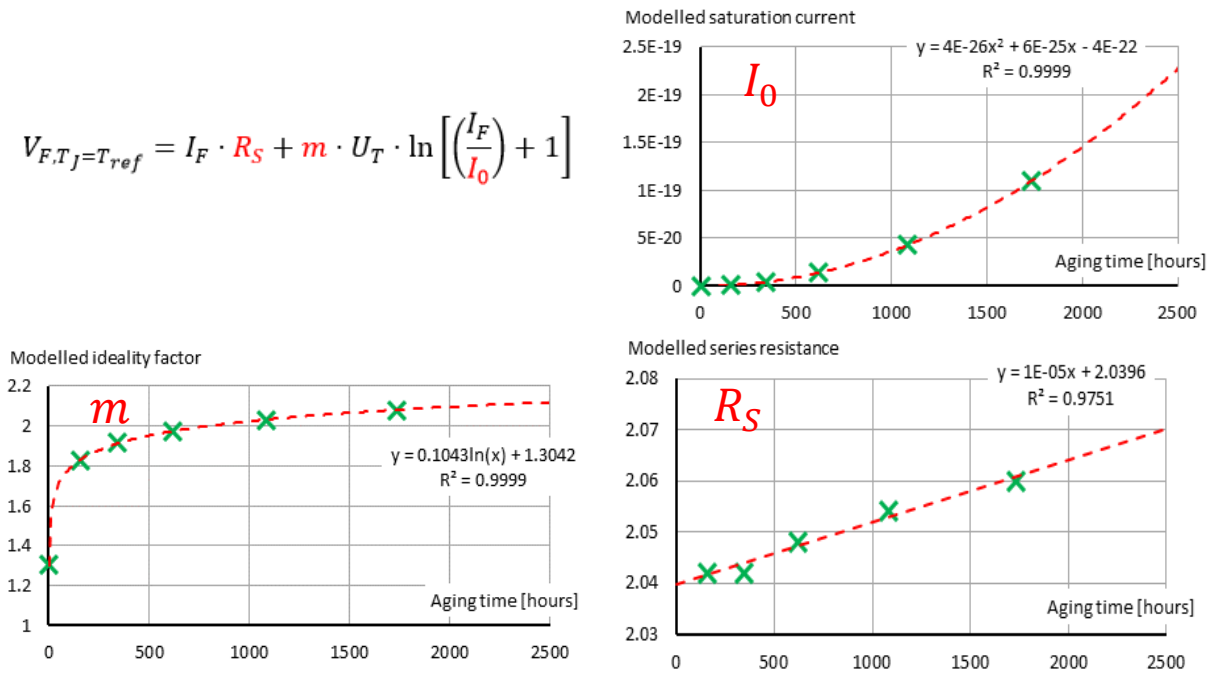


Figure 4: Ageing time dependence of the major parameters of the multi-domain LED model fitted to the LED characteristics measured during an LM-80 standard compliant ageing test.

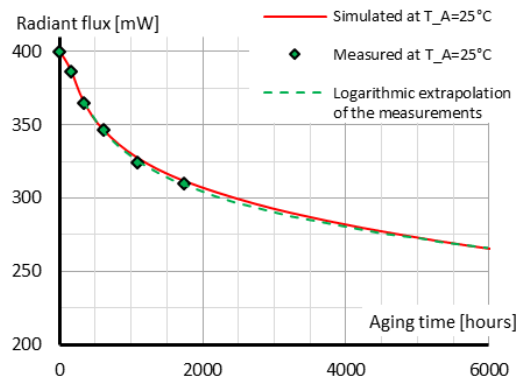


Figure 5: The match of the radiometric flux calculated with the model shown in Figure 4 with the measured flux values.

In connection with the CoB (chip on board) LED modelling tasks of the past Delphi4LED project we performed different measurements regarding the properties of phosphors used in white LEDs. For the CoB modelling work (in which we relied on chip the multi-domain LED model published in [J1]) we needed simple, traceable test structures were needed, therefore we prepared our own custom LED samples by removing the original phosphor+lens structure of the original LED vendor, resulting in bare blue LEDs that were later covered by our own phosphor layers with known and controlled properties that we characterized. **The important aspect of this from the point of view of this project was to establish a methodology with which we could prepare, characterize and model pairs of bare blue and phosphor converted white LEDs in which the same LED chip and package structure was used.** Through the ageing

of such pairs of blue and white LED we may have the opportunity to separate ageing processes associated with the LED chip and ageing processes associated with the phosphor+lens. Results of these activities have been reported in an open access journal paper and in two conference papers [J2], [C3], [C4]. (Similar matched pairs of blue and phosphor converted LED light sources were used for modelling emission spectra, see later in this report.)

Based on the results of the first project year we obtained a cleared image about the LED lifetime testing/modelling related issues and could identify further research goals. As part of a Signify-led international consortium, this allowed us to work out and submit a new H2020 European project proposal (H2020-ECSEL-2019-2-RIA-878396-2 TwinLED proposal). In the second proposal stage most of the technical workplan was developed by us. The extended and upgraded version of the TwinLED **proposal got funded in 2020, under the name AI-TWILIGHT [32]**

In the second year of the project we finalized and published the LED model that (based on LM-80 [22] compliant test results) could be used to study the operating properties LEDs at any instance of their operating time, assuming any practical pair of their operating current and temperature, i.e. the process of ageing. Using this, we created a theoretical model of constant light output control scheme of an LED luminaire for its entire predicted lifespan, that considers the effects of both the changes of the luminaire’s operating temperature and the LED ageing [J3].

Applying this model and using archived meteorological records, we predicted the electrical energy saving and possible life-time enhancement potential of an LED luminaire equipped with such an ageing and temperature compensated constant light output control scheme.

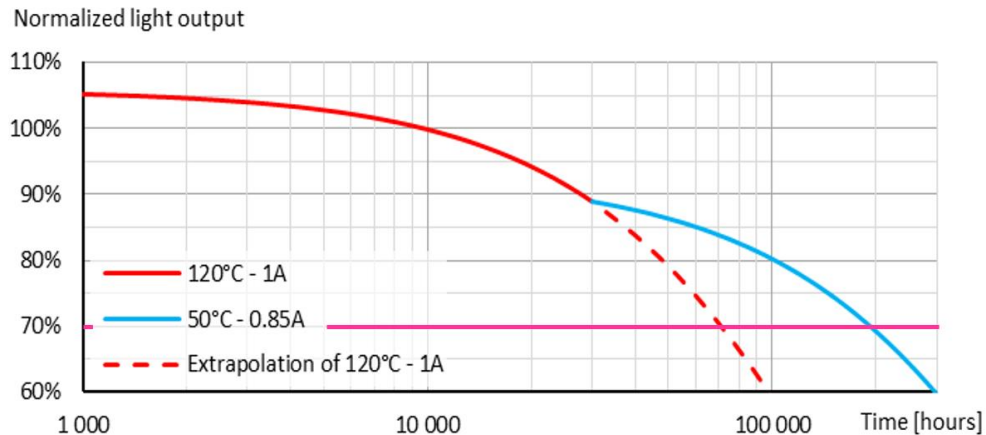


Figure 6: For the explanation of the term “lifetime-budget”: with respect to the ageing trajectory corresponding to standard ageing conditions (here: luminous flux depreciation as shown by the red curve) the actual operating conditions (higher/lower current or temperature) accelerate or decelerate (blue curve) the process of LED ageing, decreasing or increasing the expected lifetime of an LED. The effect of the forward current and junction temperature can be considered with the Arrhenius-equation.

We defined the term **“lifetime budget”** (expected remaining useful lifetime at a given ageing time after ageing under standard laboratory test conditions with a given junction temperature and forward current) that is consumed quicker or slower, as the conditions dictate due to the changing the ageing trajectory, As illustrated in Figure 6, **this describes the ageing as an efficiency parameter with respect to the initial, pristine, 0h states of LEDs.**

For the calculation this we suggested a relationship that is analogous with the basic relationships used to describe kinetics of chemical reactions. This suggestion is based on the analysis of the archived results of one of our prior LED ageing experiments with a time span of 7730 h of effective LED operation. For this data analysis our initial, Excel based parameter identification tool was used.

Between September 2019 and March 2020 (until the start of the COVID restriction) we aged Seoul 2525 types of LEDs. During these tests only two samples survived in a state that allowed a comprehensive characterization by the means of iso-thermal IVL measurements over a wide range (i.e. multiple dozens of pairs) of junction temperatures and forward currents. These samples could be aged up to 4000 hours. Having fitted our models to the recorded test data of the initial 2000 hours of operation of these LEDs, their behaviour for the subsequent 2000 hours (up to 4000 h) could be predicted accurately (Figure 7).

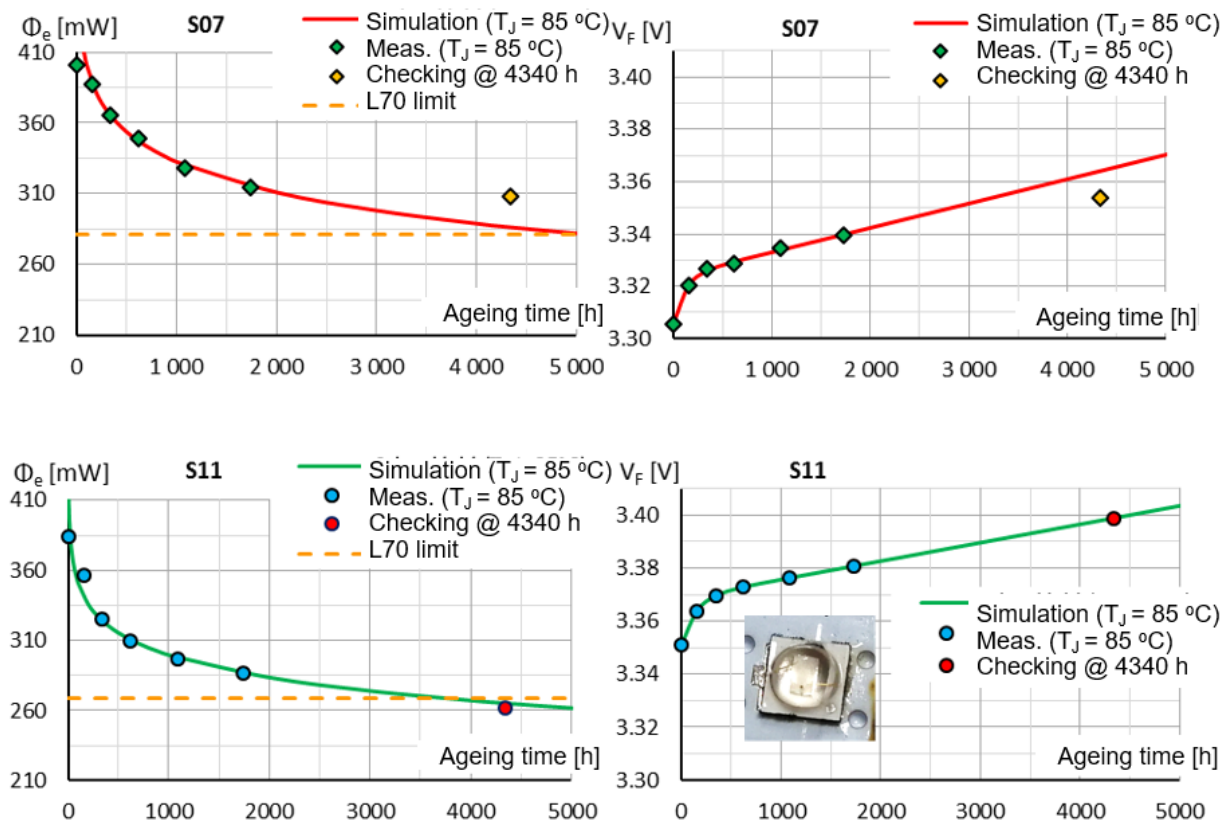


Figure 7: The predictive power of the forward voltage and luminous flux models (green lines) fitted to the initial 2000 h of ageing (blue dots): data measured later (beyond 4000 h) was precisely calculated (red dots).

One has to note however, that due to the burn-in period of about 100 h, the initial test data have to be neglected since our model is not valid for the burn-in behavior. But the model perfectly describes the post burn-in operation in terms of the operating chip (junction) temperature, forward voltage and emitted total radiant flux. **In principle, the model provides analytical formulae to represent the ageing time dependence of the major parameters (e.g. saturation currents, ideality factors, series resistances) of our latest, Delphi4LED-type chip level multi-domain LED model. The results of this work were published in an open access journal paper [J3].**

A major drawback of the test based modelling approach is its huge laboratory test resource demand.

We attempted to minimize time needed for the iso-thermal IVL characterization of the Seoul 2525 LEDs by defining the number of operating points to the minimum recommended for modelling. Due to the small size of these LEDs the time needed to for reaching thermal steady-state was 30..60 seconds (that, unfortunately, with progress of ageing has increased. The characterization of the samples however, including all necessary checks and reached 3 hours per sample. During this experiment 87 measurements were needed, resulting in a total testing time of about 260 hours. This compared to the total ageing time of 1735 hours means cca. 15% the overall testing time. Assuming a LED population of 90 samples, in compliance with the recommendations of the TM-21-11 technical memorandum [24] (min. 10 samples measured at 3 different forward currents at 3 different temperatures), rather considering the characterization time of 6-8 hours/package typical for power LEDs, the total measurement time required at every 1000 hours of the aging test would be cca. 500..700 hours.

Considering the price of the test equipment suited for isothermal IVL characterization of LEDs, performing the above outlined measurements with multiple test setups operated in parallel would be very expensive. Thus, having a quicker characterization tool with a new process and control software would greatly enhance the chances of LED lifetime modelling outlined above. The realization of such a new measurement solution is one of the major objectives of the **European research project AI-TWILIGHT [32]** (project H2020 ECSEL-2020-2-RIA 101007319-2), that is focused on the following:

- increase the throughput of the LED characterization process needed for multi-domain modelling by 1 order of magnitude (considering an LED population size recommended by the lifetime testing standards),
- possible replacement of the very lengthy LM-80 lifetime testing with new data analysis techniques based on artificial intelligence methods,
- working out digital twins, health monitoring and predictive maintenance schemes for large and/or safety critical LED-based lighting applications/infrastructures (e.g. for streetlighting, lighting of large offices, horticulture lighting or automotive lighting).

Through our pioneering work performed with the present (OTKA / NKFIH K 128315) project we had a major role in working out the AI-TWILIGHT H2020 ECSEL RIA 101007319 project proposal that beyond the further development of our proposed modelling approach also targets the preparation of the industrial and commercial exploitation of the research results. This research proposal, submitted in September 2020 got accepted and funded, the project was officially kicked-off on the 1st of June 2021. The project coordinator is Signify (successor of Philips Lighting and Philips Research); major industrial partners include Lumileds, Hella, BMW, Infineon, GL Optik, LightingLab, PI-Lighting, TRIDONIC; major academic partners are TU Delft, TU Eindhoven, TU Darmstadt, Padova University.

Thanks to the partners in the AI-TWILIGHT project we have/had access to larger LED populations relevant from the point of view investigation of LED ageing. We also had the opportunity for a wider cooperation regarding the **improvement of the throughput of the combined thermal and radiometric/photometric LED characterization procedure need in LED lifetime testing and modelling by one order of magnitude** [C5], [C6]. Our activity in the TC-91 technical committee [33] of CIE (International Commission of Illumination). The work of this technical committee targets the development of a new international standard on optical measurements of LEDs by merging the recommendations of the CIE 225:2017 and 226:2017 documents regarding laboratory and in-line testing of LEDs, respectively. **These international relations ensure that our research regarding the test procedures related to the identification of new ageing indicators of LEDs, on top of its scientific goals, also has significant industrial relevance.**

As an example of these new corporations, we defined and launched new LED ageing test with the LED reliability and lifetime testing group (headed by prof. Matteo Meneghini) of the Padova University who are our project partners in AI-TWILIGHT.

We also launched new, power cycling based LED ageing tests in cooperation of Materials Research Center Leoben who are also AI-TWILIGHT partners. We studied multiple LED populations, driven by square-wave signals of different frequencies. We had a twofold goal: on the one hand, confirming our hypothesis that there is a specific frequency where LED ageing takes place at the highest pace; and on the other hand, we aimed to model the effect and time evolution of degradations due to these stress conditions, through the series of ageing time dependent element values of the compact thermal model of the junction-to-ambient heat-flow paths of packages (Figure 9) derived from the structure functions obtained during the power cycling tests [C7]. **Based on the final evaluation of some of our completed tests we can state, that PWM-based dimming with frequencies below 1 kHz has significant effect on the degradation of the die attach layer (see Figure 8) [J4]: in case of the investigated LED population having the strongest effect at around 313 Hz.** The duty factor of the pulse-width modulated signal also affects the ageing; a duty factor of 50% causing the fastest degradation. It is worth noting, that in case of modulation frequencies higher by a decade (e.g. above 10 kHz) the PWM-based dimming has no significant accelerating effect of ageing [J4]. This result is important from the point of human centric lighting, since the threshold frequency of vanishing the unconscious effects of modulated light (such as causing seizure in individuals prone to epilepsy) is also around 10 kHz, according to some human experiments [34].

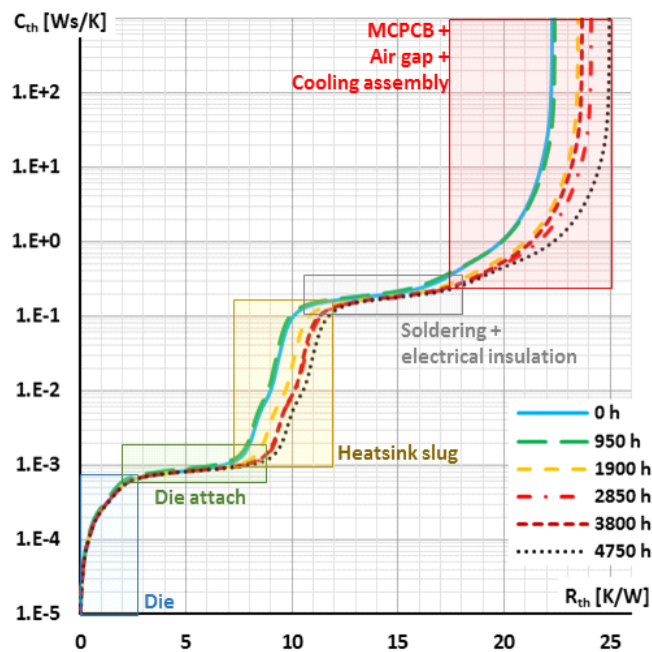


Figure 8: Series of structure functions obtained during ageing tests of LEDs driven by a pulse-width modulated forward current indicate the degradation of the die attach layer.

During the ageing tests we ran into several problems. One example is the value of LEDs' junction temperature measured wrongly when the lens of the tested LEDs gets browned. We shared these findings first in our second conference paper published in the proceedings of the 28th THERMINIC Workshop [C9]. The undergraduate students (Máté Lukács, Bence Bodnár) employed from the project budget who worked

in the Thermal and Reliability Laboratory of the Department of Electron Devices of BME had significant contributions to these measurements.

The last important finding is, that compared to constant DC current driven LEDs the PWN driven LEDs age more quickly. Our early access journal paper [J4] published in 2023 and a conference paper [C10] accepted for the 2023 quadrennial session and conference of CIE discuss the above 3 topics.

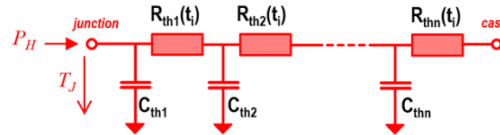


Figure 9: Schematic of the compact thermal model of an LED package with ageing time (t) dependent element values [C7]. According to our findings there are no significant changes in the thermal capacitances, therefore in the model we can use constant thermal capacitances.

In connection with the heat-flow path degradations due to dynamic thermo-mechanical stresses, we also performed simulation experiments in order to study different possible methods to identify the ageing time dependent element values of the compact thermal model of the LED packages (Figure 9) from the structure functions (aimed also to support lifetime prognostics of power semiconductor device packages [37]) and to study, what practical approximations and simplifications can be applied without compromising the accuracy of the model-based predictions. We report these results in a paper accepted for the 29th THERMINIC Workshop [C7]. In these simulation experiments basically, we emulated the degradation of the die attach layer (such as shown in Figure 8). The results are summarized in Figure 10.

We had the following major findings:

- The simplest way to define the thermal resistance associated with the die attach layer is the distance between $R_{th\Sigma}$ coordinates of the intersection points of the $C_{th\Sigma}(R_{th\Sigma})$ structure function and the constant thermal capacitance reference levels corresponding to the chip and the copper base plate, respectively, indicated by the cyan (for the chip) and blue, purple, green, mustard yellow, orange and red vertical lines (for the copper base), as shown in Figure 10a.
- An alternate method is to use the distances between the peaks (maxima) of the $K(R_{th\Sigma}) = dC_{th\Sigma}/dR_{th\Sigma}$ differential structure functions (or possibly, between their inflection points), as indicated in Figure 10b, but the few false maxima of the $K(R_{th\Sigma})$ function close to the origin make it difficult to use this method.
- Compared to the distance between the intersection points of the $C_{th\Sigma}(R_{th\Sigma})$ structure function and constant thermal capacitance lines, the distances between the maxima of the $K(R_{th\Sigma})$ differential structure functions are smaller, but the ratios of the thermal resistance increments remain the same, therefore, if for the prognostics algorithm [37] it is enough to provide the relative changes of the die attach thermal resistance, the using the method based on the distance of the intersection points is preferred.
- The change of the thermal capacitance of the die attach layer does not seem to have any significant effect on the structure functions, see Figure 10d, therefore, both in case of the compact thermal models of LED packages aimed to be used in connection with the age dependent chip level multi-domain LED model, both for a prognostics algorithm aimed at the prediction of the remaining useful lifetime (such as the one reported in [37]) one can use constant thermal capacitance values.

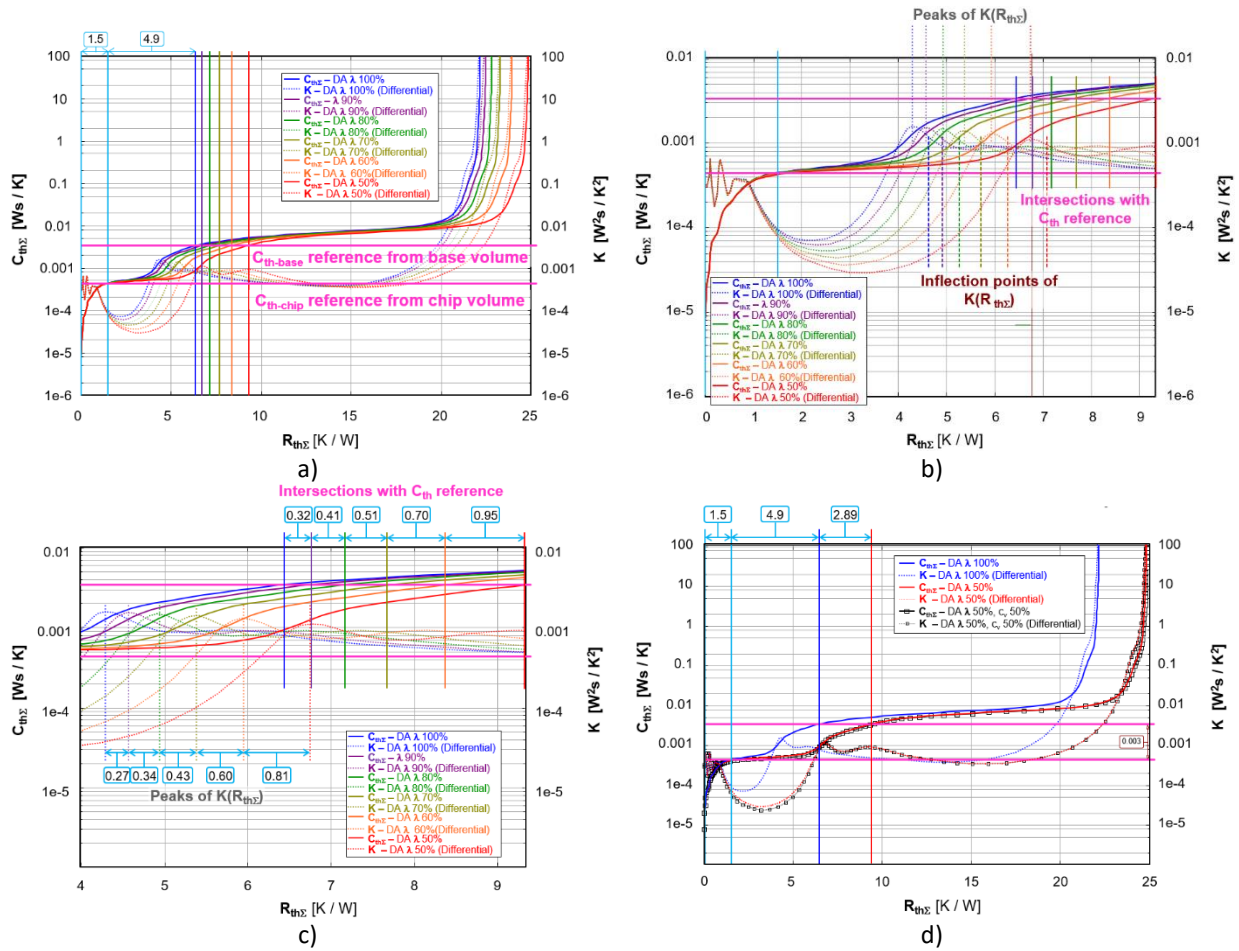


Figure 10: Manifestation of the emulated degradation of the die attach layer of LED packages in the structure functions derived from the transient junction temperature response [C7]:

- identification of the partial thermal resistance associated with the die attach layer with the help of the intersections of the structure functions with the constant thermal capacitance reference levels defined by the volume of the semiconductor chip and the copper base plate, at different levels of degradation
- alternate method for the identification of the die attach thermal resistance with the help of the peaks or the inflection points of the differential structure function
- comparison of the degradation related increments of the partial thermal resistance identified with the intersection points and with the peaks of the differential structure functions
- comparison of structure functions obtained by considering the ageing related changes the die attach thermal capacitance (black curves with black markers) and by neglecting these capacitance changes (red curves).

As mentioned in the introduction we were also dealing with the **modelling of emission spectra of LEDs**, but only in the last period of the project. Despite the limited time left for this, we achieved a couple of results, such as:

- We worked out a methodology for the accurate study of the spectral power distribution of closely matched pairs of LEDs containing bare blue chips only and white LEDs with added phosphor layer (preparation of our own, custom LED samples using phosphor layers with controlled, known properties – see Figure 11 and Figure 12), [J2], [C3], [C4], [C11], that allow the separation of the emission spectrum of a white LED into its two constituents: the spectrum of the primary emission of the blue LED chip and the spectrum of the secondary emission at longer wavelengths converted by the phosphor layer (see Figure 13) [C11]. This allows separate modelling of

monochromatic LEDs (besides blue ones, other colors such as green or red as well) and phosphor converted white LEDs [C11]. Details of our most recent sample preparation are provided in [C11].

- We developed a methodology for the measurement [C3] and modelling [J2] of the temperature dependence of certain properties of the phosphor layers (such as the conversion efficiency).
- We defined different accuracy metrics to determine the how well the different spectrum models fit the measured spectra [J5], [C11], [E6]. Using these metrics we studied the accuracy of the different spectrum models published in the literature and the model known as *Split Pearson VII* proved to be rather accurate according to these metrics. We identified and modelled the junction temperature and forward current dependence of the spectra. These dependences were well approximated with a 3rd order polynomial which was also checked against the used metrics. Within this project we could not model aged spectra yet. These studies will be conducted within the framework of the AI-TWILIGHT H2020 ECSEL project.

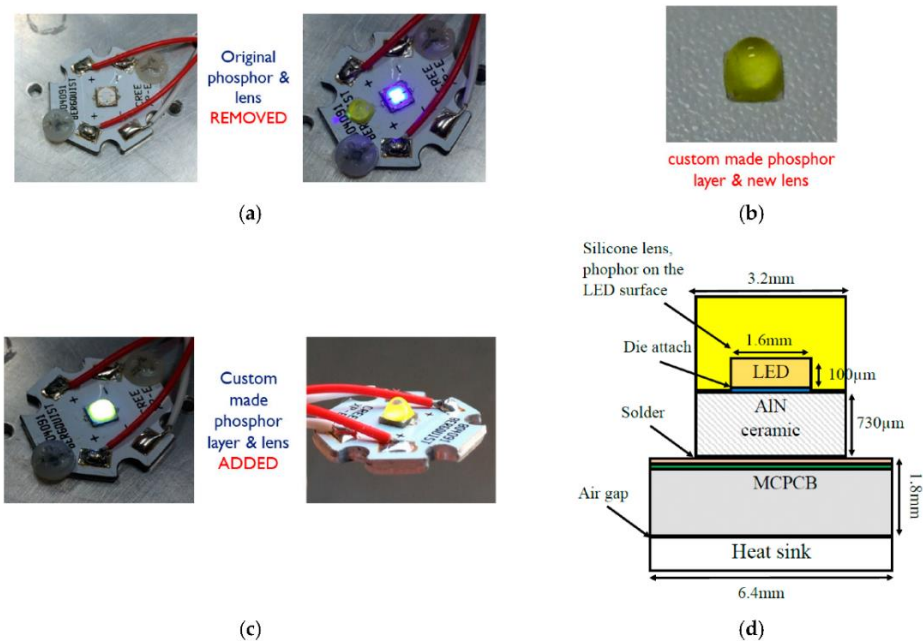


Figure 11: The first custom made matched pairs of blue and white LEDs: a) bare blue LEDs obtained from white ones by stripping of their lens and phosphor, b) our own custom made phosphor with controlled, known properties and our own lens, c) the custom made white LEDs made from these, d) sketch of the simplified 3D model of these white LEDs for the purpose of our simulation experiments [J2], [C3].

As mentioned already, we studied spectrum models known from the literature (Table 1) and we tried different “quality” metrics (such as the match of the total radiometric flux, or the color coordinates calculated from the modelled and measured spectra, or the match of the shapes of the modelled and measured spectra). The metrics defined and used were the following:

- sum of Squared Residuals (SSR),
- sum of Squared estimate of Errors (SSE),
- mean Squared Error (MSE),
- normalized Root Mean Squared Error (NRMSE),
- maximum deviation of the measured and modelled spectral power values ($Max \Delta\%$),
- difference of measured peak wavelengths and obtained after curve fitting ($\Delta\lambda_{peak}$ [nm]).

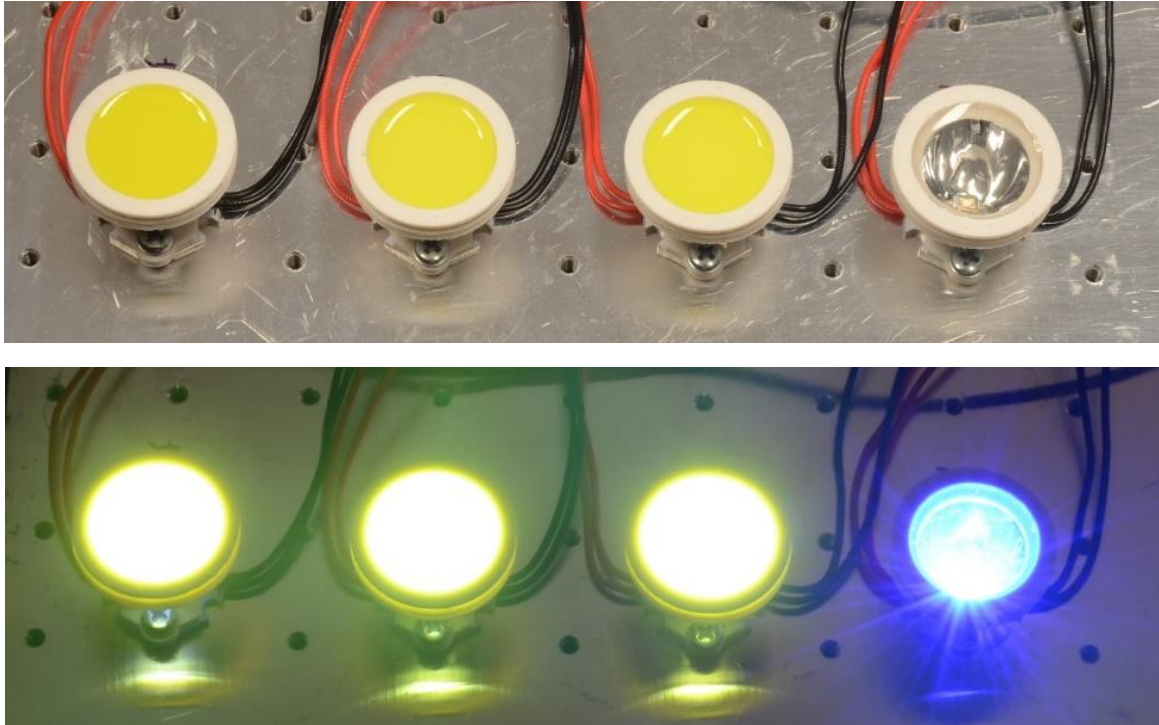


Figure 12: Custom made LED sources with our own custom remote phosphor layers, and a bare blu one, without phosphor [C11].

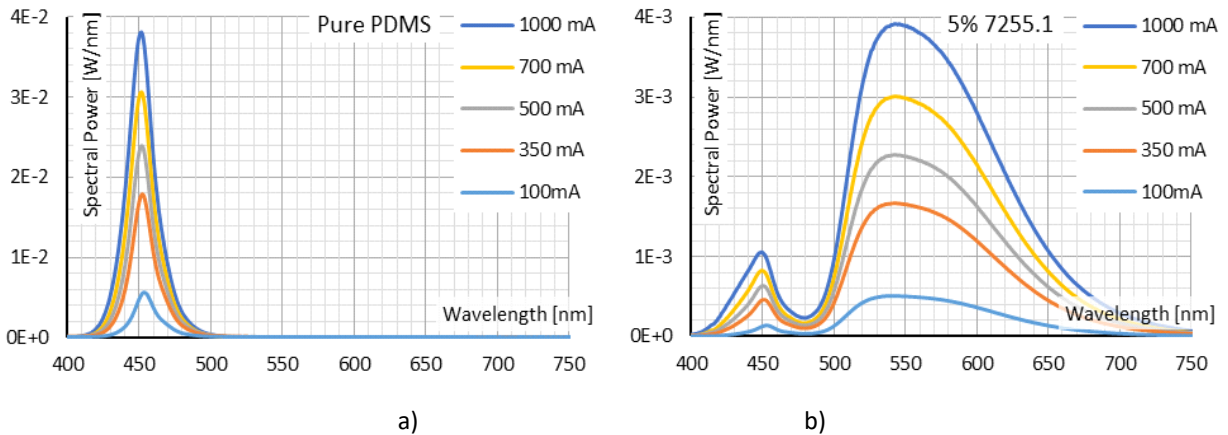


Figure 13: Spectra of LEDs of Figure 12 measured in different operating points: a) spectra of a bare blue LED without phosphor, b) spectra of a white LED equipped with a phosphor layer [C11].

Figure 14 presents the best and worst cases of the fit of spectrum models listed in Table 1, according to the different “fit quality” metrics for a wide population multiple color LEDs. The polynomial approximations proposed for the description of the operating point dependence of the parameters of the Split Pearson VII we obtained of final, combined spectrum model, having 36 parameters in total.

Table 1: Mathematical functions aimed at modelling spectra of monochromatic LED, based on Table 3 of reference [35].

Title	Model function $f(\lambda)$	
Gaussian	$f(\lambda) = A \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2}$	(1)
Split Gaussian	$f(\lambda) = A \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2} \begin{cases} \text{ha } \lambda < C, \text{ akkor } W = W_1 \\ \text{egyébként } W = W_2 \end{cases}$	(2)
Sum of Gaussian	$f(\lambda) = A_1 \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-C}{W_1}\right)^2} + A_2 \cdot e^{-\left(\frac{\lambda-C}{W_2}\right)^2}$	(3)
Second order Lorentzian	$f(\lambda) = \frac{A}{\left(1+\left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2\right)^2}$	(4)
Logistic Power Peak	$f(\lambda) = \frac{A}{S} \left(1 + e^{\frac{\lambda-C+W \cdot \ln(S)}{W}}\right)^{-S-1} \cdot e^{\frac{\lambda-C+W \cdot \ln(S)}{W}} \cdot (S+1)^{\frac{S+1}{S}}$	(5)
Asymmetric logistic peak	$f(\lambda) = A \left(1 + e^{\frac{\lambda-C+W \cdot \ln(S)}{W}}\right)^{-S-1} S^{-S} \cdot e^{\frac{\lambda-C+W \cdot \ln(S)}{W}} \cdot (S+1)^{\frac{S+1}{S}}$	(6)
Pearson VII	$f(\lambda) = \frac{A}{\left(1+\left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2 \cdot \left(2^{\frac{1}{S}}-1\right)\right)^S}$	(7)
Split Pearson VII	$f(\lambda) = \frac{A}{\left(1+\left(\frac{\lambda-C}{W}\right)^2 \cdot \left(2^{\frac{1}{S}}-1\right)\right)^S} \begin{cases} \text{if } \lambda < C, \text{ then } W = W_1, S = S_1 \\ \text{else } W = W_2, S = S_2 \end{cases}$	(8)
Asymmetric Double sigmoidal	$f(\lambda) = \frac{A}{1+e^{\frac{\lambda-C}{S_1}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{1+e^{-\frac{\lambda-C}{S_2}}}\right)$	(9)

Figure 15 presents spectra calculated with this ultimate, combined model for 12 different operating points (pairs of forward currents and junction temperatures).

Besides modelling spectra of monochromatic color LEDs, the Split Pearson VII model proved to be suitable for modelling the spectra of the secondary, longer wavelength light converted from the blue light by the phosphors of white LEDs. We created a procedure to separate the spectra of white LEDs (Figure 13) into their constituents to enable modelling the primary and secondary emissions of white LEDs separately. The result of this separation is presented in Figure 16. The modelling results for the separated spectrum constituents are shown in Figure 17.

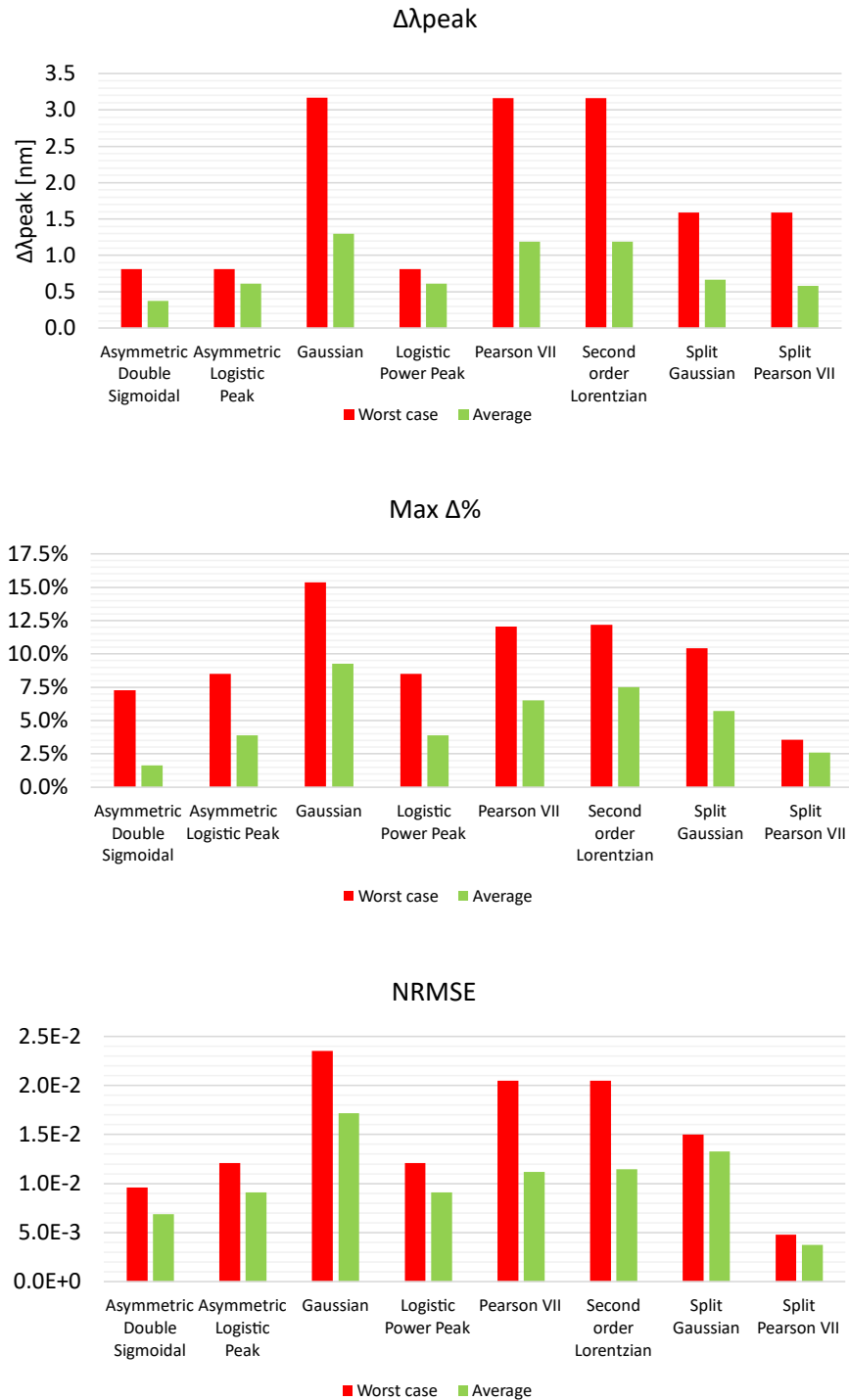


Figure 14: Evaluation of the models of Table 1 according to different metrics, for a mixed population multiple color LEDs (such as pl. Osram Oslon® SSL 80 red and Osram Osconiq® P 2226 blue LEDs): the worst overall fit according the each metric is indicated by red bars, the best overall fit is indicated by green bars.

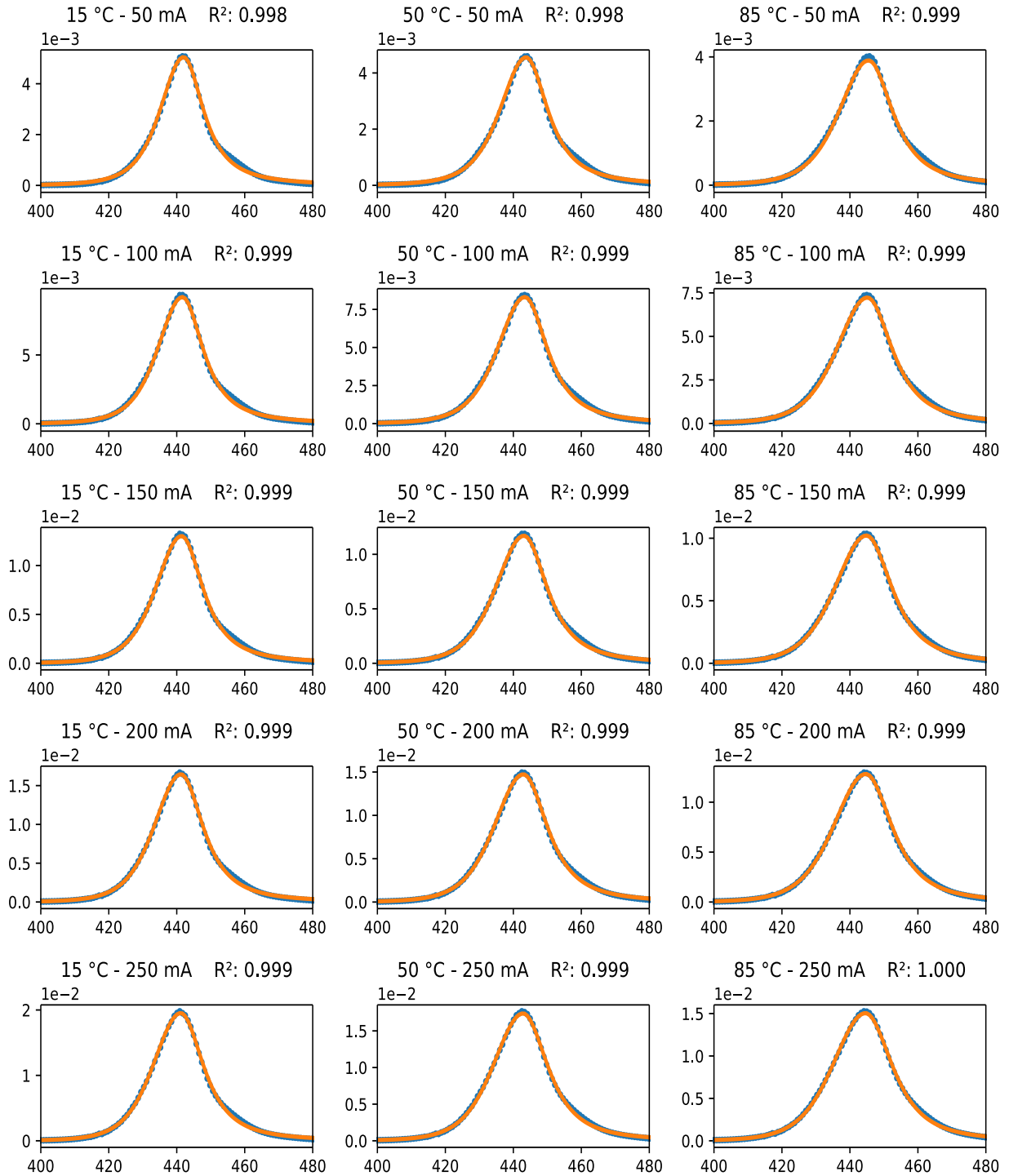


Figure 15: Comparing the polynomial regression model (orange curves) with the measured spectra (blue curves) in different operating points. Horizontal axis: wavelength in nm, vertical axis: spectral power density in W/nm [C11].

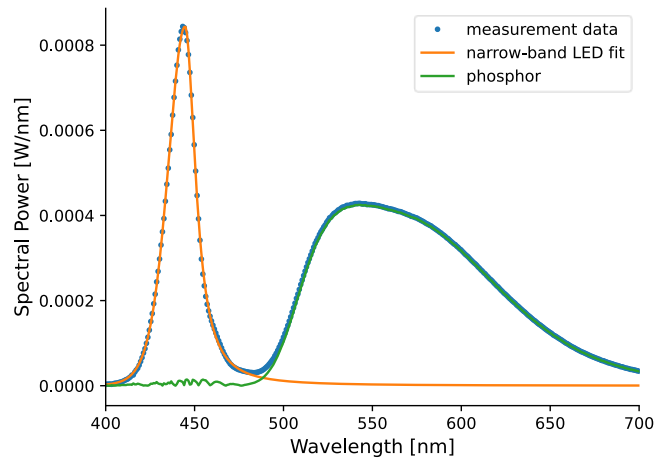


Figure 16: The result of the automated process of splitting the spectrum of a phosphor converted white LED into the primary blue emission (orange curve) and the converted secondary emission (green curve). The blue dot markers represent the values of the measured white spectrum.

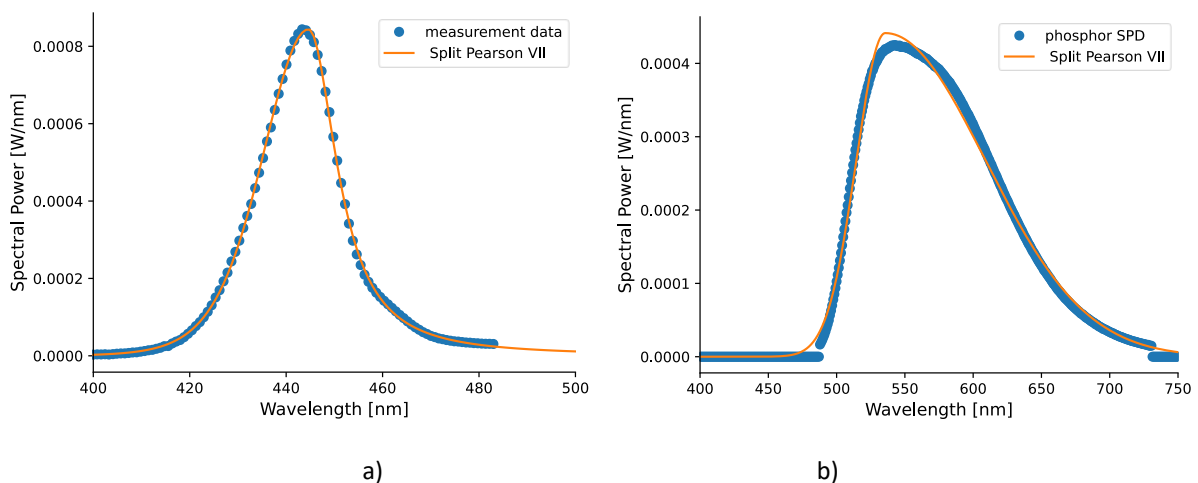


Figure 17: Spectra calculated by the Split Pearson VII model: a) for the blue part and b) for the the spectrum of the converted light.

Our cooperation with the team of prof. Gábor Harsányi is also closely related to our project. As a result of this, **HAST tests of LEDs that were subject of our detailed isothermal IVL characterization were performed at different, controlled relative humidity / temperature values. The goal of these investigations is to see in details how the relative humidity affects the ageing of LEDs [C8].** Like in case of the ageing tests that were performed in cooperation with the Padova University, the pre- and post-stress characterization of the LED samples was performed in our Thermal and Reliability Laboratory. The detailed analysis of the test results was not completed yet at the closure of the present project. This activity is also continued in cooperation with our international partners within the framework of the AI-TWILIGHT project.

Other results

In connection with surprisingly fast degradation of the new LED luminaires installed in the corridor of the 3rd floor of building Q of BME (where our department is located) we **provided a detailed expert’s report on the physical inspection, measurements, and simulation of these luminaires for the facility management of the building that relied in many aspects on our project results.** We presented our findings about the failed LEDs of these luminaires at the XII-th Hungarian LED Conference organized by the Hungarian Lighting Society. The extended version of this presentation was published in the 2020-2021 lighting year book of the society [B1] and the English version of this report was published at the 2021 27th THERMINIC Workshop, available in the IEEE Xplore database [C12].

In 2020 János Hegedüs submitted his PhD dissertation [D1] titled "Lifetime multiphysical modelling of LEDs" (Fénykibocsátó diódák multi-fizikai élettartam modellezése) and on the 24th February 2021 he successfully defended it. His results presented in his thesis work are closely related to this project.

In 2020 Gusztáv Hantos also submitted his PhD dissertation [D2] titled "Measurement Techniques of Light Emitting Diodes" and on the 17th of June 2022 he successfully defended it. His results presented in his thesis work are closely related to this project.

The refined LED measurement procedure proposed by Gusztáv Hantos (new K-factor calibration) became part of the new recommendations published in the 2022 revision of JEDEC’s LED thermal testing standard [36].

With András Poppe as co-editor, in **2022 Springer published a new book about the theory and practice of thermal transient measurements of packaged semiconductor devices [B2], in which chapter 6 [B3] co-authored by András Poppe provides an up-to-date description of LEDs’ thermal measurements, including the new calibration procedure proposed by Gusztáv Hantos.**

Also closely related to this project, András Poppe was an invited speaker at the **"Trends and Challenges in Reliability" c. workshop held on 9-10 May 2019 in Eindhoven, in the Netherlands. His 40 minutes invited talk was titled "High Accuracy Testing",** presenting also some initial results of the project, in the context of R&D activities at the Department of Electron Devices of BME and the at the MicReD division of SIEMENS Mentor Graphics (today: SIEMENS Industry Software) [E1].

János Hegedüs won the 3rd prize of the 2019 PhD students’ research forum with his personal research plan closely related to this project [E3].

It is also related to the project, that in response to the joint call for papers of the Pro Progressio Foundation and the weekly journal **“Life and science” (Élet és Tudomány) János Hegedüs and Gusztáv Hantos submitted their paper titled “Opportunities offered by LEDs: smart lightsources” (A LED-ekben rejlő lehetőségek: Okos fényforrások) that was awarded by the 1st prize of the Foundation [E4].**

On 23 July 2022 András Poppe had a keynote lecture at the SCEE-2022 conference (The 14th Conference on Scientific Computing in Electrical Engineering) in Amsterdam, the Netherlands, titled "Creating new multi-domain digital twins of LEDs with an attempt to describe their ageing for predictive maintenance schemes" [E5], that provided a high level overview about the R&D goals and results in relation to LED reliability testing and modelling.

With his work on LED spectrum modelling, our MSc student Gyula Lipák participated at the 2022 scientific conference of students (TDK) of BME's Faculty of Electrical Engineering and Informatics and won a 2. prize [E6].

References

- [1] The website of the European R&D project Delphi4LED: <http://www.delphi4LED.eu/>
- [2] G. Martin, A. Poppe, S. Lungten, V. Heikkinen, J. Yu, M. Rencz, R. Bornoff, "Delphi4LED - From Measurements to Standardized Multi-Domain Compact Models of Light Emitting Diodes (LED)", *ELECTRONICS COOLING* 22:(12) pp. 20-23. (2016), <http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/Electronics-Cooling-December-2016-Delphi4LED.pdf>
- [3] Poppe A., "Delphi4LED - A mérésektől a LED-ek szabványos multi-domain kompakt modelljéig: szimulációs modellek fejlesztése a szilárdtest világítástechnikai ipar beszállítói láncának különböző szereplői számára", In: Világítástechnikai Évkönyv 2016-2017: LED-jen FÉNY!, 272 p., Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2017. pp. 94-101. (in Hungarian), <http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/Vilagitastechnikai-Evkonyv-2016-2017-Delphi4LED.pdf>
- [4] JEDEC JESD51-51 Standard, "Implementation of the Electrical Test Method for the Measurement of Real Thermal Resistance and Impedance of Light-Emitting Diodes with Exposed Cooling" (2012), <https://www.jedec.org/system/files/docs/JESD51-51.pdf>
- [5] JEDEC JESD51-52 Standard, "Guidelines for Combining CIE 127:2007 Total Flux Measurements with Thermal Measurements of LEDs with Exposed Cooling Surface" (2012), <https://www.jedec.org/system/files/docs/JESD51-52.pdf>
- [6] CIE 127:2077 Technical Report, "Measurement of LEDs", ISBN 978-3-901906-58-9, <https://cie.co.at/publications/measurement-leds>
- [7] CIE 225:2017 Technical Report, "Optical Measurement of High-Power LEDs", ISBN 978-3-902842-12-1, <http://dx.doi.org/10.25039/TR.225.2017>
- [8] A. Poppe, "A step forward in multi-domain modeling of power LEDs", In: Proc. of the 28th IEEE SEMI-THERM Symp., 18-22 March 2012, San Jose, USA, pp. 325-330, <http://dx.doi.org/10.1109/STHERM.2012.6188868>
- [9] A. Poppe, "Multi-domain compact modeling of LEDs: an overview of models and experimental data", *MICROELECTRONICS JOURNAL* 46(12 A): 1138-1151. (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.mejo.2015.09.013>
- [10] Poppe A., Szalai A., Hegedüs J., "LED-ek multi-domain szimulációs modelljei és azok gyakorlati vonatkozásai", In: Németh Z., Nagy B. V. (szerk.), Világítástechnikai Évkönyv 2014-2015: Fények és tények, 208 p., Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2015. pp. 112-121. (in Hungarian), http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/VTT-Evkonyv2015-LED_modellezes.pdf
- [11] A. Poppe, G. Farkas, V. Székely, Gy. Horváth, M. Rencz, "Multi-domain simulation and measurement of power LED-s and power LED assemblies", In: Proc. of the 22nd IEEE SEMI-THERM Symp., 14-16 March 2006, Dallas, USA, pp. 191-198, <http://dx.doi.org/10.1109/STHERM.2006.1625227>
- [12] A. Poppe, J. Hegedüs, A. Szalai, R. Bornoff, J. Dyson, "Creating multi-port thermal network models of LED luminaires for application in system level multi-domain simulation using SPICE-like solvers", In: Proc. of the 32nd IEEE SEMI-THERM Symp., 14-17 March 2016, San Jose, USA, pp. 44-49, <http://dx.doi.org/10.1109/SEMI-THERM.2016.7458444>
- [13] A. Poppe, "Simulation of LED Based Luminaires by Using Multi-Domain Compact Models of LEDs and Compact Thermal Models of their Thermal Environment", *MICROELECTRONICS RELIABILITY* 72(5): 65-74 (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2017.03.039>
- [14] C. J M Lasance, A. Poppe (eds.), "Thermal Management for LED Applications", (Solid State Lighting Technology and Application Series, Vol. 2), Springer, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4614-5091-7>
- [15] Hegedüs J., Poppe A., "Közvilágítási lámpatestek karakterizálása multi-domain LED modellekkel – a LED karakterisztikáktól a lámpatest üzemi fényáramáig", *ELEKTROTECHNIKA* 110(3-4): 13-20. (2017), (in Hungarian) <http://www.mee.hu/files/files/et-2017-03-04.pdf#page=13>

- [16] J. Hegedüs, G. Hantos, A. Poppe, "Light output stabilisation of LED based streetlighting luminaires by adaptive current control", *MICROELECTRONICS RELIABILITY* 79(12): 448-456 (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2017.06.060>
- [17] J. Hegedüs, P. Hotváth, T. Szabó, A. Szalai, A. Poppe, "A New Dimming Control Scheme of LED Streetlighting Luminaires Based on Multi-Domain Simulation models of LEDs in order to Achieve Constant Luminous Flux at Different Ambient Temperatures", In: Proc. of the Conference on "Smarter Lighting for Better Life" at the CIE Midterm Meeting 2017, 23-25 October 2017, Jeju, South Korea, CIE x044:2017, pp. 267-276., http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/CIE2017-Midterm-OP37_Hegedus-et-al_A_new_dimming_Final.pdf
- [18] J. Hegedüs, P. Horváth, G. Hantos, T. Szabó, A. Szalai, A. Poppe, "A New Dimming Control Scheme of LED Based Streetlighting Luminaires Using an Embedded LED Model Implemented on an IoT Platform to Achieve Constant Luminous Flux at Different Ambient Temperatures", Proc. of Lux Europa 2017, 18-20 September 2017, Ljubljana,
- [19] A. Poppe, G. Hantos, G. Farkas, F. Szabó, J. Joly, J. Thomé, J. Yu, K. Bosschaartl, E. Juntunen, E. Vaumorin, A. di Buccianico, Th. Merelle, "Inter Laboratory Comparison of LED Measurements Aimed as Input for Multi-Domain Compact Model Development within the Del-phi4LED H2020 Project", In: Proc. of Lux Europa 2017, 18-20 September 2017, Ljubljana, Slovenia, pp. 304-309, http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/LuxEuropa2017-ID37_Poppe_final_v2.pdf
- [20] A. Poppe, G. Farkas, F. Szabó, J. Joly, J. Thomé, J. Yu, K. Bosschaartl, E. Juntunen, E. Vaumorin, A. di Buccianico, T. Merelle, "Inter Laboratory Comparison of LED Measurements Aimed as Input for Multi-Domain Compact Model Development within a European-wide R&D Project", In: Proc. of the Conference on "Smarter Lighting for Better Life" at the CIE Midterm Meeting 2017, 23-25 October 2017, Jeju, South Korea, CIE x044:2017, pp. 569-579, http://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/CIE2017-Midterm-PP16-Poppe_et_al_Interlaboratory-final.pdf
- [21] J. Hegedüs, G. Hantos, A. Poppe, "Lifetime Iso-flux Control of LED based Light Sources", In: Proc. of the 23rd International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'17), 27-29 September 2017, Amsterdam, The Netherlands, Paper Paper_181, <http://dx.doi.org/10.1109/THERMINIC.2017.8233816>
- [22] IESNA LM-80-08 standard, "IES Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources", Illuminating Engineering Society, New York, 2008
- [23] The website of the European R&D project NANOTHERM FW7 ICT project: <http://project-nanotherm.com/>
- [24] IESNA TM-21-11 technical memorandum, "Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources", Illuminating Engineering Society, New York, 2011
- [25] A. Poppe, G. Molnár, P. Csuti, F. Szabó, J. Schanda, "Ageing of LEDs: A Comprehensive Study Based on the LM80 Standard and Thermal Transient Measurements", In: CIE 27th Session-Proceedings, CIE 197:2011: (Volume 1), Sun City, South Africa, 10-15 July 2011, pp. 467-477, <https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/4251>
- [26] A. Szél, Z. Sárkány, M. Bein, R. Bornoff, A. Vass-Várnai, M. Rencz, "Lifetime estimation of power electronics modules considering the target application", In: Proc. of the 31st IEEE SEMI-THERM Symp., 15-19 March 2015, San Jose, USA, pp. 332-335, <http://dx.doi.org/10.1109/SEMI-THERM.2015.7100183>
- [27] A. Szél, Z. Sárkány, M. Bein, R. Bornoff, A. Vass-Várnai, M. Rencz, "Mission Profile Driven Component Design for Adjusting Product Lifetime on System Level", In: Proc. of the International Conference on Electronics Packaging (ICEP), 14-17 April 2015, Kyoto, Japan, pp. 385-389, <http://dx.doi.org/10.1109/ICEP-IAAC.2015.7111041>
- [28] G. Hantos, J. Hegedüs, M. Rencz, A. Poppe, "Aging Tendencies of Power LEDs Under Different Stress Conditions During Thermal Reliability Testing", In: Proc. of the 21st International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'15), 30 September - 2 October 2015, Paris, France, Paper 6_4_id152, <http://dx.doi.org/10.1109/THERMINIC.2015.7389624>
- [29] G. Hantos, L. Juhász, M. Rencz, "In Situ Thermal Reliability Testing Methodology for Novel Thermal Interface Materials", In: Proc. of the 20th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'14), 24-26 September 2014, London, United Kingdom, Paper 1010, <http://doi.org/10.1109/THERMINIC.2014.6972532>

- [30] K. Paisnik, A. Poppe, T. Rang, G. Rang, "Physics related modeling of Power LEDs", In: Proc. of the 13th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC'12), 3-5 October 2012, Tallinn, Estonia, pp. 57-60, <http://dx.doi.org/10.1109/BEC.2012.6376814>
- [31] E. Ikonen, A. Vaskuri, H. Baumgartner, T. Pulli, T. Poikonen, O. Kantamaa, P. Kärhä, "Online measurement of LED junction temperature for lifetime prediction", Abstracts booklet of the CIE Conference on "Smarter Lighting for Better Life" at the CIE Midterm Meeting 2017, 23-25 October 2017, Jeju, South Korea, pp. 36-37
- [32] The website of the European R&D project AI-TWILIGHT: <https://ai-twilight.eu/>
- [33] A CIE TC 2-91 műszaki bizottság tevékenységi köre: <https://cie.co.at/technicalcommittees/optical-measurement-methods-led-packages-and-led-arrays>
- [34] Arnold Wilkins: Darwin versus visual discomfort (Darwin és a vizuális zavaró hatások viszonya), Világítástechnikai Évkönyv 2018-2019, MEE Világítástechnikai Társasága, Budapest, 2019, pp. 4-19, <https://vilagitas.org/stuff/evkonyv/2018-2019/MEEVTT-evkonyv-2018-2019.pdf>
- [35] Frank REIFEGERSTE; Jens LIENIG; "Modelling of the Temperature and Current Dependence of LED Spectra", Journal of Light & Visual Environment 32(3): 288-294,2008, <https://doi.org/10.2150/jlve.32.288>, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jlve/32/3/32_3_288/article/-char/en
- [36] JEDEC JESD51-51A Standard, "Implementation of the Electrical Test Method for the Measurement of Real Thermal Resistance and Impedance of Light-Emitting Diodes with Exposed Cooling" (2022), <https://www.jedec.org/system/files/docs/JESD51-51A.pdf>
- [37] A. Vulli; G. Schlottig; M. Orkisz; M. Firlac; E. Bianda; "A model-based approach for prognostics of power semiconductor modules", In: Proceedings of The 25th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2023, 4-8 September 2023, Aalborg, Denmark, accepted, in press

Publications related to the project

Journal papers

- [J1] Poppe, A. ; Farkas, G. ; Gaál, L. ; Hantos, G. ; Hegedüs, J. ; Rencz, M.; "Multi-Domain Modelling of LEDs for Supporting Virtual Prototyping of Luminaires", *ENERGIES* 12(10): 1909, 2019, <https://doi.org/10.3390/en12101909>
- [J2] Pohl, L.; Hantos, G.; Hegedüs, J.; Németh, M.; Kohári, Zs.; Poppe, A.; "Mixed Detailed and Compact Multi-Domain Modeling to Describe CoB LEDs", *ENERGIES* 13(16): 4051, 2020, <https://doi.org/10.3390/en13164051>
- [J3] Hegedüs, J.; Hantos, G.; Poppe, A.; "Lifetime Modelling Issues of Power Light Emitting Diodes", *ENERGIES* 13(13): 3370, 2020, <https://doi.org/10.3390/en13133370>
- [J4] J. Hegedüs; G. Hantos; M. Lukács; B. Bodnár; G. Lipák, A. Poppe; "Lifetime test of pulse width modulated LEDs supplemented with thermal investigations", *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* (Early Access), 2023, <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2023.3278101>
- [J5] Lipák Gyula; Hegedüs János; Hantos Gusztáv; "A LED-ek segítségével előállított fehér fény", *Elektrotechnika* 116(5-6): 42-47, 2023, <https://www.mee.hu/files/files/ssd2/et-2023-7-8.pdf>

Publications in conference proceedings

- [C1] J., Hegedüs ; G., Hantos ; A., Poppe; "A step forward in lifetime multi-domain modelling of power LEDs", In: Proceedings of the 29th Session of the CIE, Vienna, Ausztria : International Commission on Illumination (CIE), pp. 1154-1161. , 8 p., 2019, https://doi.org/10.25039/x46.2019.P_0074 (open access)
- [C2] J., Hegedüs ; G., Hantos ; A., Poppe; "Reliability Issues of Mid-Power LEDs", In: Proceedings of the 25th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems / IEEE Xplore; <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/8911538/proceeding>, 2019, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2019.8923802>

- [C3] J., Hegedüs ; G., Hantos ; M., Németh ; L., Pohl ; Zs., Kohári ; A., Poppe; "Multi-domain characterization of CoB LEDs", In: Proceedings of the 29th Session of the CIE, Vienna, Ausztia : International Commission on Illumination (CIE), pp. 387-397., 2019, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2019.8923802> (open access)
- [C4] Pohl, L.; Németh, M.; Hegedüs, J.; Hantos, G.; Kohári, Zs.; Poppe, A; "Multi Domain Modelling and Simulation of White CoB LEDs", In: Proceedings of the 25th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems / IEEE Xplore; <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/8911538/proceeding>, 2019, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC.2019.8923856>
- [C5] Poppe, András ; Hegedüs, János ; Hantos, Gusztáv ; Csuti, Péter ; Rencz, Márta; "Concepts for High throughput LED Testing and High-speed Optical Transients of LEDs", In: Proceedings of the 28th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems / IEEE Xplore; <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9950458/proceeding>, 2022, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC57263.2022.9950671>
- [C6] András Poppe; Gusztáv Hantos; János Hegedüs; Ferenc Ender; "IMPLEMENTATION OF A HIGH-SPEED LED CHARACTERISATION SYSTEM", In: Proceedings of the CIE 2023 Conference "Innovative Lighting Technologies" at the 30th Quadrennial Session of the CIE, 18-20 September 2023 (accepted), 2023
- [C7] András Poppe; Gusztáv Hantos; János Hegedüs; Ferenc Ender; "An automated method for creating compact dynamic thermal models for in-situ prognostics of power electronics and power LED packages", In: Proceedings of the 29th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems, 27-29 September 2023, accepted
- [C8] Hegedüs, János ; Hantos, Gusztáv ; Poppe, András ; Lukács, Máté ; Bodnár, Bence; "The Effect of Dimming Frequency on the Aging of Power LEDs", In: Proceedings of the 28th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems / IEEE Xplore; <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9950458/proceeding>, 2022, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC57263.2022.9950630>
- [C9] Hegedüs, János ; Hantos, Gusztáv ; Poppe, András ; Lukács, Máté ; Bodnár, Bence ; Lipák, Gyula; "Thermal characterization issues of LEDs during reliability testing", In: Proceedings of the 28th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems / IEEE Xplore; <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9950458/proceeding>, 2022, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC57263.2022.9950652>
- [C10] János Hegedüs; Gusztáv Hantos; András Poppe; Róbert Kovács; Péter Bojta; Gábor Harsányi; "LED LIFETIME TESTS FOR CIRCUIT SIMULATION MODELLING", In: Proceedings of the CIE 2023 Conference "Innovative Lighting Technologies" at the 30th Quadrennial Session of the CIE, 18-20 September 2023 (accepted), 2023
- [C11] Gyula Lipák; Dalma Takács; János Hegedüs; Gusztáv Hantos; "MODELLING THE SPECTRAL POWER DISTRIBUTION OF MONOCHROMATIC AND PHOSPHOR-CONVERTED POWER LEDs", In: Proceedings of the CIE 2023 Conference "Innovative Lighting Technologies" at the 30th Quadrennial Session of the CIE, 18-20 September 2023 (accepted), 2023
- [C12] János, Hegedüs; Gusztáv, Hantos ; Péter, Gábor Szabó ; András, Poppe; "Rapid Failure Analysis of Installed LED Luminaire Through Standardized Processes", In: Proceedings of the 27th International Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Systems / IEEE Xplore; <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/9626389/proceeding>, 2021, <https://doi.org/10.1109/THERMINIC52472.2021.9626528>

Dissertations

- [D1] Hegedüs János: Fénykibocsátó diódák multi-fizikai élettartam modellezése (Lifetime multiphysical modelling of LEDs), Repository of BME, <https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/15129>, 2021
- [D2] Hantos Gusztáv: Measurement techniques of light emitting diodes, Repository of BME, <https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/17001>, 2022

Books, book chapters

- [B1] Hegedüs, János ; Hantos, Gusztáv ; Szabó, Péter Gábor ; Poppe, András: Egy világításkorszerűsítési projekt megbízhatósági problémái (Reliability issues of a lighting replacement project), Világítástechnikai Évkönyv 2020-2021 (Lighting Yearbook 2020-2021), Magyar Elektrotechnikai Egyesület Világítástechnikai Társaság (2022) 167 p. pp. 74-88, 2022, <https://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/Vilagitastechnikai-Evkonyv-2020-2021-LEDmegbizhatosag.pdf>
- [B2] M. Rencz, G. Farkas, A. Poppe (eds): Theory and Practice of Thermal Transient Testing of Electronic Components, Springer, 2022, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-86174-2>
- [B3] G. Farkas, A. Poppe, Z. Sárkány, A. Vass-Várnai: Thermal Transient Measurements on Various Electronic Components, In: M. Rencz, G. Farkas, A. Poppe (eds), Theory and Practice of Thermal Transient Testing of Electronic Components, Springer (2022), pp. 209-318, 2022, https://doi.org/10.1007/978-3-030-86174-2_6

References to other project results

- [E1] Spice multi-domain LED model parameter identification tool: <https://extractor.ai-twilight.org/>
- [E2] A. Poppe, G. Hantos, J. Hegedüs: High Accuracy Testing, Invited talk at the "Trends and Challenges in Reliability" workshop, 9-10 May 2019, Eindhoven, The Netherlands, 2019
- [E3] Hegedüs János 2019. évi BME Kutatói Pályázatán 3. díjat nyert kutatási terve: http://doktori.bme.hu/bme_palyazat/2019/honlap/hegedus_janos_hu.htm
- [E4] Hegedüs, János ; Hantos, Gusztáv: A LED-ekben rejlő lehetőségek: Okos fényforrások (Opportunities offered by LEDs: smart lightsources), ÉLET ÉS TUDOMÁNY LXXV. : 28. pp. 878-880., 2020, https://www.bme.hu/hirek/20200703/Oktatok_es_hallgatok_ismeretterjeszto_irasait_dijaztak_a_muegyetemi_cikkpalyazaton
- [E5] Poppe András: Creating new multi-domain digital twins of LEDs with an attempt to describe their ageing for predictive maintenance schemes, Keynote talk, The 14th Conference on Scientific Computing in Electrical Engineering / <https://scee-conferences.org/pages/2022-schedule-detailed>, 2022, <https://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/SCEE-2022-AP-ack.pdf>
- [E6] Essay of Gyula Lipák, submitted to the Students' Scientific Conference: <https://tdk.bme.hu/VIK/eleszk2/LEDek-segitsegevel-eloallitott-feher-feny>, and <https://tdk.bme.hu/Browse/Papers?y=2022&f=VIK&d=EET&su=Hegedus-Janos-Dr>