

## ❖ Egy világításkorszerűsítési projekt megbízhatósági problémái

– Hegedüs János, Hantos Gusztáv, Szabó Péter Gábor, Poppe András –

### Tartalmi kivonat

*Napjaink műszaki termékeit a piaci verseny, valamint az emberi és gazdasági elvárások alapvetően meghatározzák. Az elektronikai eszközök fejlesztése során a megkapó külső ma már majdnem olyan fontos követelmény, mint maga a műszaki tartalom. Az elérhető funkciók bővítése, a termékre specifikus hatások javítása, a kedvezőbb vásárlói ár és természetesen a megbízhatóság növelése szintén a fő szempontok közé tartoznak; ez utóbbi azonban nem minden esetben a várt irányba módosul.*

*A BME Elektronikus Eszközök Tanszéke hosszú ideje foglalkozik tokozott félvezető eszközök termikus megbízhatósági tesztelésével és szimulációjával. Jelen cikkünkben egy világításkorszerűsítési projekt során felmerült élettartam problémák okainak felderítését érdeklében végzett összetett vizsgálati eljárását mutatjuk be, mindazokkal a mérés-technikai és számítógéppel támogatott modellezési és szimulációs módszerekkel együtt, amelyek segítségével a LED-es világítótestek termikus eredetű problémái feltárhatók. Ennek során felhasználtunk kontaktmentes módszereket, úgy, mint vizuális, infrakamerás és fényűrűségmérő kamerás méréseket, számítógépes termikus szimulációkat, valamint termikus tranziens tesztelésen alapuló laboratóriumi és in-situ méréseket is.*

### 1. Bevezetés

Napjaink világítástechnikai fejlődési és fejlesztési irányait nem szükséges hosszasan ecsetelni: mára a félvezető egykristály alapú fényforrások szinte mindenütt teret hódítottak maguknak, legyen szó beltéri, kültéri vagy akár járműipari alkalmazásokról.

Azonban még mindig kevésbé ismeretes, hogy a LED-ek esetében az eszköz felmelegedését okozó veszteségi hő nem csupán a villamos fogyasztást növeli szükségtelenül, de a fényforrás hatásfokát és élettartamát is egyaránt csökkenti<sup>1</sup>. Az úgynevezett retrofit fényforrások esetében a méret és fejelés szerinti korlátok miatt a gyártók jellemzően komoly kompromisszumokra kényszerülnek a termék hőelvezetését illetően, azonban a dedikált LED-es világítótestek kialakítása során már egészen más kényszer köti meg a tervezők kezeit, ami pedig nem más, mint az eladhatóság. A vásárló ugyanis nem „hőkamerás szemekkel” tekint a boltok polcain vagy a webes katalógusok oldalain található LED-es lámpákra<sup>12</sup>, így a mind inkább kompakt méret, az alacsony ár és a vonzó termék külső mellett az adott alkalmazási körülmények közt ténylegesen várható termékélettartam (fényáramtartás, pl. B50-L70 értelemben) kérdése elsikkad.

A világító diódák működése során meghatározó fontosságú paraméter a LED lapka, avagy az úgynevezett pn átmenet hőmérséklete, amelynek emelkedésével nem csupán az eszköz felvett elektromos teljesítménye csökken (állandó nyitóáramot feltételezve), de hatásfoka és fényhasznosítása is romlik, valamint felgyorsulnak a különféle öregedési folyamatok is<sup>13</sup>. A korábbi fényforrásokkal ellentétben ugyanis a LED-ekre nem a hirtelen, fatális meghibásodás a jellemző, hanem a sugárzott teljesítmény és az összfényáram folyamatos csökkenése. Egy alultervezett hőátadó képességű (vagy a termikus hatások figyelembevételét teljesen mellőzve tervezett) világítótest összfényárama tehát nagyobb meredekséggel csökken, de szélsőségesen rossz tervezés eredménye-

képpen a LED-ek hirtelen, fatális meghibásodása is bekövetkezhet. Tipikusnak tekinthető a termékadatlapon szereplő 50..100 ezer órás élettartam, amely kb. 10 év folyamatos üzemnek felel meg, míg a valóságban a termikusan rosszul tervezett, vagy a termikus szempontokra fittyet hányó módon installált LED-es világítótestek 30%-ot meghaladó összfényáram-csökkenése 1 éven belül is bekövetkezhet. Jelen írásunkban egy ilyen világítótest típus több példányának kb. 6..12 hónapon belüli teljes tönkremenetelének részletes gyökér-ok (root-cause) analízisével foglalkozunk.



**1. ábra. A gipszkarton álmennyezet elemekre, a korábbi süllyesztett mélyszugárzó kompaktfénycsöves lámpatestek kiváltására alkalmazott, ultravékony, kör alakú LED-es világítótest a termikus mérőállomásunkhoz csatlakoztatva**

### 2. A vizsgált világítótest

A BME Elektronikus Eszközök Tanszékén vizsgált LED-es világítótest típus egy új mintadarabja az 1. ábrán látható. A világításkorszerűsítési projekt során a mennyezeti, ultravékony, kör alakú világítótesteket gipszkarton álmennyezeten kivágott, csupán egy

8 cm átmérőjű lyukakon keresztül szerelték fel. Néhány hónappal a telepítés után azonban a világítótestek összfényárama szemmel is jól láthatóan csökkenni kezdett, nem sokkal később pedig több világítótest is fatálisan meghibásodott. Az egyik ilyen világítótestet szétszerelve nyilvánvaló volt, hogy a probléma elsődlegesen termikus eredetű.



**2. ábra. A világítótest oldaláról levált LED-szalag és az elszenesedett belső diffúzor lemez**

A gyártó a sorosan-párhuzamosan kapcsolt LED-eket a lámpatest hengerpalástjának belső peremére ragasztotta fel, illetve, a kívánt térbeli fényeloszlás kialakítása érdekében belső diffúzor lemezeket alkalmaztak. A többszörös műanyag diffúzor rétegek miatt a világítótest optikai hatásfoka 80% körüli, ami körülbelül 2W disszipációt okoz az optikai elemekben.

A meghibásodás fő oka a 2. ábrán jól megfigyelhető. A LED-ekkel szembe helyezett műanyag diffúzor lemez helyenként megolvadt, sőt, elszenesedett, egyes esetekben az elszenesedő LED tok-lencsékhez hozzá is égett. A LED-eket hordozó szalag a lámpatest oldaláról levált, megsugorodott, megtöredezett és helyenként el is tört.

A meghibásodott világítótest szétszerelését és szemrevételezését követően először kontaktmentes in-situ vizsgálatokat végeztünk a még működőképes, de már láthatóan

<sup>1</sup>Ez az írás a szerzők által a 2021. évi XII. LED konferencián tartott előadás során elmondottak bővített változata.

megromlott állapotú világítótesteken, majd termikus szimulációk és laboratóriumi mérések segítségével próbáltuk feltárni a hiba pontos okait.

### 3. Fényképezőgépes, infrakamerás és fénysűrűségmérő kamerás felvételek; in-situ mérések

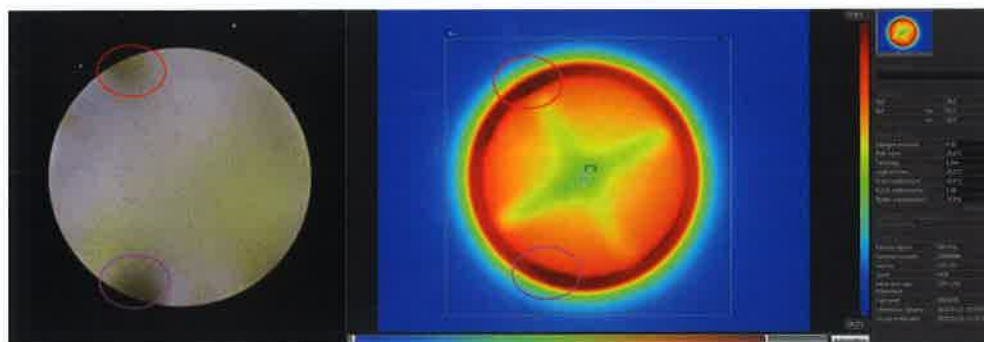
Először kontaktmentes eljárásokat alkalmaztunk a még üzemképes, de már szemmel láthatóan leromlott állapotú világítótestek vizsgálatára. A képek a jó összehasonlíthatóság érdekében a világítótest síkjával párhuzamosan és mindig ugyanabból a pozícióból készültek.

A világítótesteknél tapasztalt probléma már szemmel is jól látható volt, de pontosabb képet kaphatunk akár egy ad hoc rövid záridejű mobiltelefonos fotó elkészítésével is. A 3. és 4. ábrák bal oldalain a vizuális érzetet jól visszaadó normál fényképezőgépes fotók láthatók. Összehasonlításképpen, az ábrák jobb oldalai az infrakamerás<sup>[4]</sup> (3. ábra) és a fénysűrűségmérő kamerás<sup>[5]</sup> (4. ábra) felvételeket mutatják, pozícióhelyes beállításban. A sötét foltok jól láthatóan egybeesnek a legforróbb pontokkal; a lámpatest lokális túlmelegedése a LED-ek hatásfokcsökkenését és gyorsabb öregedését idézi elő, amely pozitívan visszacsatolt folyamat és az idő előrehaladtával egyre jobban erősíti önmagát.

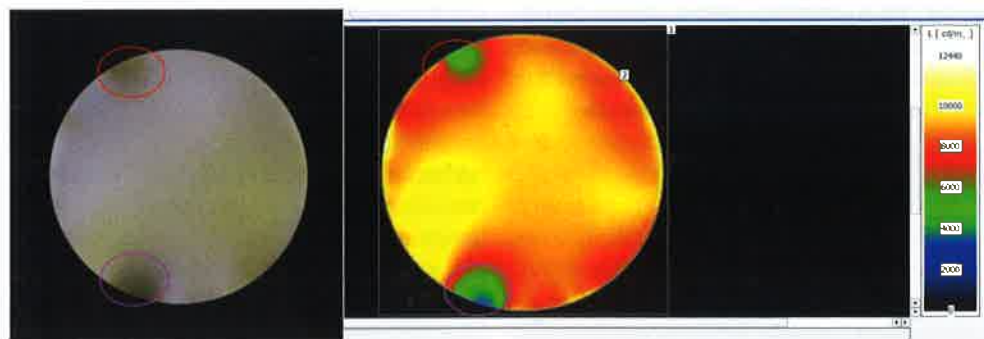
A világítótesten mért legmagasabb hőmérséklet 57 °C feletti. Ez első ránézésre nem is tűnne soknak, azonban a LED lap-

kák normál üzemi hőmérséklete ennél jóval magasabb, különösen ott, ahol a hordozószalag leválása miatt a hőellenállás drasztikusan meg is növekszik.

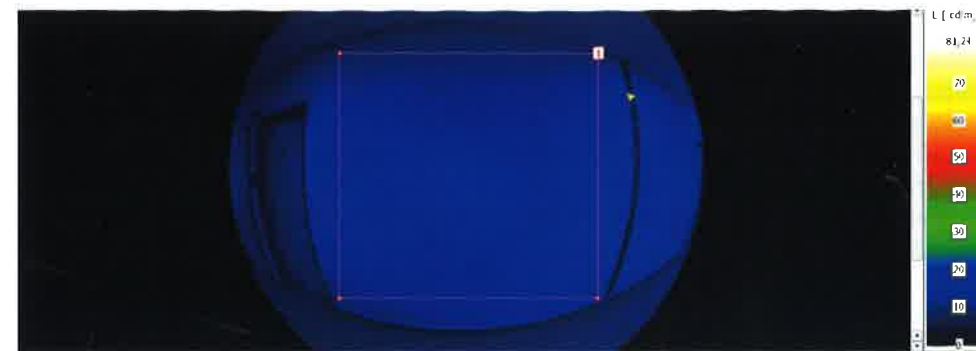
A fénysűrűségmérő kamerás felvételekről (a 4. ábra jobb oldala) leolvasható továbbá, hogy a túlmelegedett LED-ek helyén akár 50%-os fénysűrűségcsökkenés is mérhető. Ennél a világítótest típusnál tehát fel-



3. ábra. Normál és IR kamerás felvételek: a legforróbb pontok és a barnult foltok egybe esnek.



4. ábra. Normál és fénysűrűségmérő kamerás képek: a legforróbb pontok és a barnult foltok egybe esnek, lokálisan 50%-os fénysűrűségcsökkenést okoznak.



5. ábra. A világítótest melletti falfelület

lehet akár a degradálódó világítótest által megvilágított síkfelületek képe is. A fénysűrűségmérő kamera további felvételeiből (5. és 6. ábrák) látható, hogy a hibás világítótest térbeli fényeloszlása sem a kívánalmaknak megfelelő.

Az érintésmentes vizsgálatokat a világítótest termikus szimulációi követték. Ezek elvégzéséhez elsődlegesen a világítótest 3D modelljére van szükség, ez az úgynevezett digitális iker. Itt érdemes mindenképpen megjegyezni, hogy ezek a digitális iker nem csupán a hiba-analízisben alkalmazhatók, hanem már a tervezési fázis során is hasznos visszacsatolást, visszajelzést adhatnak a fejlesztőknek. Ez az alapja az úgynevezett ipar 4.0 szemléletmódnak is<sup>[6][11]</sup>.



6. ábra. Az 5. ábrán bekeretezett terület kontrasztját digitálisan kiemelve kapott kép

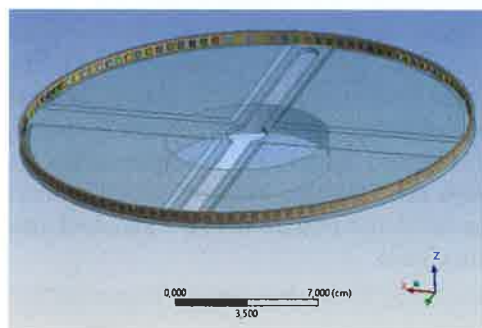
merül annak lehetősége, hogy az esetleges meghibásodás ilyen módszerrel már akár a kezdeti stádiumban is detektálható lehet. Hasonlóképpen, a hibajelenség indikátora

lehet akár a degradálódó világítótest által megvilágított síkfelületek képe is. A fénysűrűségmérő kamera további felvételeiből (5. és 6. ábrák) látható, hogy a hibás világítótest térbeli fényeloszlása sem a kívánalmaknak megfelelő.

### 4. A LED világítótest termikus szimulációja

A világítótestről részletes CAD modell készült, ennek látható egy részlete a 7. ábrán. Megjegyzendő, hogy a modellek elkészítésekor a geometria pontos leképzése mellett a CFD-alapú termikus szimulációk gyakorlatában szokásos életszerű közelítésekkel és elhanyagolásokkal éltünk (pl. a felületi érdesség vagy az anyagparaméterek, valamint a végeredmény szempontjából irreleváns részletek elhagyása tekintetében). Általánosan kijelentjük, hogy a becsült (standard anyagadatbázisokból származó)

anyagparaméterek és a részletes geometriai modellezés során alkalmazott méret bizonytalanságokat elfogadhatónak tekintjük, ha a termikus szimulációs eredmények a termikus mérési eredményeket tendenciaszerűen jól visszaadják, illetve ha a mért és szimulált eredmények eltérése 20%-on belüli, mert ezek alapján, már biztonsággal megfogalmazhatók a hiba-ok analízis szempontjából lényeges kvalitatív tanulságok.



7. ábra. A 3D CAD modell szerkesztése

Az elvégzett szimulációknak kettős célja volt; egyfelől a CAD modell és a modellparaméterek verifikálása, másfelől pedig különféle álmennyezet kialakítások vizsgálata:

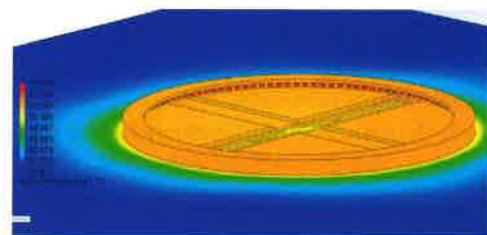
1. A hibás lámpák helyén felszerelt álmennyezet.
2. Módosított kialakítású álmennyezet, melynek során a mechanikai rögzítés számára kialakított kör alakú lyuk átmérőjét 15cm-re növeltük.
3. A gipszkarton helyett egy 3 mm vastag alumínium lemezből hajlított álmennyezetet definiáltunk, a közepén az eredetivel megegyező átmérőjű kivágással, amely kialakítás vélhetően jó konduktív hűtést biztosít a lámpatest számára.

Megjegyzendő, hogy abban az épületben, amelyben a vizsgált világítótesteket felszerelték, az épület egyes részein a 3. pont szerinti környezetbe telepítették a lámpákat. (A 3. pont szerinti környezetben 1 év folyamatos üzem után sem volt tapasztalható

drasztikus, laikus szemmel is észrevehető összfényáram csökkenés.) A szimulációs eredményekre a 8. ábra mutat egy szemléltető példát.

Az eredeti elrendezést szimulálva az látható, hogy a lámpatest hőmérséklete 60-62 °C, míg a LED-ek hőmérséklete 73 °C körüli.

A nagyobb kivágást alkalmazva (2. eset) a lámpatest hőmérséklete 58-60 °C, míg a LED-ek hőmérséklete 71 °C körüli, vagyis a világítótestek méretéhez jobban illeszkedő kivágás jobb hűtést is biztosít, ahogyan az várható is volt.



8. ábra. A hibás lámpák helyén felszerelt álmennyezeti kialakításra végzett szimuláció eredményei

A jó hővezető álmennyezet panel esetén pedig (3. eset) a lámpatest hőmérséklete 34 °C, míg a LED-ek hőmérséklete 46 °C körüli, de nyilvánvaló is volt, hogy ez az elrendezés lesz a három közül a legjobb hűtési megoldás. Fontos megjegyezni, hogy a LED-ek hőmérséklete mindhárom esetben úgy lett meghatározva, hogy közben jó minőségű termikus kontaktust feltételeztünk a LED-ek és a lámpatest között.

#### 4.1 Összegzés és konklúziók

##### – 1. eset

A termikus szimulációkat összegezve elmondható, hogy alapesetben LED-ek maximális hőmérséklete kb. 10-15%-kal kisebb, mint a mért eredmények. Ennek valószínűsíthető okai az anyagparaméterbeli bizonytalanságok lehetnek, illetve az, hogy a szimulált térrészben jobb konvekciós hűtés alakult ki, mint a valós fizikai környezetben (az ál-

mennyezet és a teherhordó födém közötti szűk térben).

További bizonytalanságot okoz a LED tokok termikus modelljének hiánya. Ez a bizonytalanság a LED tokok termikus tranzien méréséből megállapítható ún. kompakt termikus tok modell alkalmazásával jelentősen csökkenthető. A későbbi laboratóriumi mérések során az ehhez szükséges mérések is megtörténtek és a kompakt termikus modellt is sikeresen előállítottuk.

A szimulációs eredmények a mért valódi értékektől a lámpatest szállítója/gyártója szempontjából jó irányban térnek el (alacsonyabb hőmérsékletek), ezért a további két esettanulmány számára referenciaként tekinthetők.

#### 4.2 Összegzés és konklúziók

##### – 2. eset

A hőmérséklet kb. 2 °C-kal csökkent az első esethez képest:

– A LED-ek hőmérséklete:

73,1 °C → 71,9 °C

– A lámpatest hőmérséklete:

61,7 °C → 59,4 °C

Ezek alapján elmondható, hogy az álmennyezet közepén a kivágás nagysága javítja a környezet irányába a hőátadási képességet. Levonható az a következtetés, hogy a lehetségeshez képest kb. fele, vagy harmad akkora átmérőjű szerelő lyuk kialakítása és alkalmazása rontotta a termikus viszonyokat és hozzájárult a LED-ek öregedésének gyorsulásához.

#### 4.3 Összegzés és konklúziók

##### – 3. eset

A hőmérséklet kb. 27 °C-kal csökkent az első esethez képest:

– A LED-ek hőmérséklete:

73,1 °C → 46,1 °C

– A lámpatest hőmérséklete:

61,7 °C → 34,5 °C

Ezek alapján elmondható, hogy ha a gipszkarton álmennyezet lámpatesteket hordozó

elemeit egy hasonló méretű 3 mm vastag alumínium lemezre cserélték volna, az nagyban segítette volna a világítótestek, és bennük a LED tokok hűtését. Az alacsonyabb hőmérsékletű LED-ek öregedése sokkal lassabb és jó hűtéssel a termikus határfelületi anyagok és az optikai elemek degradációja (delamináció, sárgulás/barnulás) elkerülhető lett volna, vagy az öregedési folyamat lassabb lehetett volna.

*Általánosan kijelenthető, hogy az inkább hőszigetelő tulajdonságú gipszkarton álmennyezet modulok nyújtotta termikus környezet távol áll az ilyen típusú LED-es világítótestek hosszú élettartamát biztosító, ideális termikus környezettől. Fontos lenne, hogy az ilyen LED-es világítótestek alkalmazási útmutatói egyértelmű ajánlásokat fogalmazzanak meg a telepítési környezettől elvárt termikus tulajdonságokat illetően.*

Egyúttal ez azt is jelenti, hogy a gyártói ajánlásokból fakadó többlet költségekkel (pl. az alumínium lemez ára) már a tervezés és a világítótest típus kiválasztása során számolni kell, avagy, az ajánlások figyelmen kívül hagyása esetén célszerű becsléseket végezni a várható élettartam csökkenésére, ezáltal pedig tekintetbe venni a várható karbantartás és/vagy csere újabb anyagi vonzatait is.

#### 4.4 Fontos megjegyzések

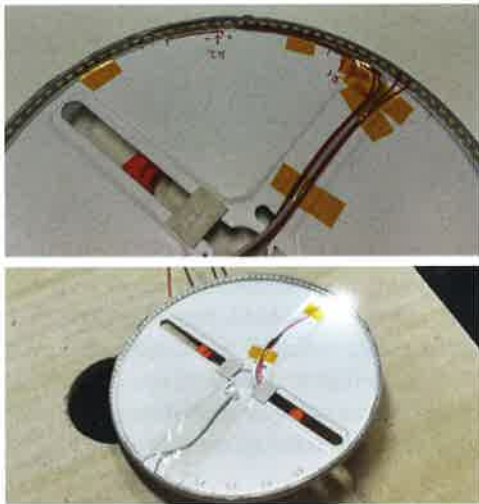
A világítótest optikájának 80%-os hatásfoka miatt az optikában fellépő kb. 2 W többlet disszipációval nem számoltunk, illetve a világítótest és az álmennyezet panel érintkező felületeinek egyenetlenségeit és az e miatt jelentkező extra kontakt hőellenállás hatását nem modelleztük.

#### 5. A világítótestben található LED-ek laboratóriumi mérései

A vizsgálatokat egy fatálasan meghibásodott, beégett LED tokokat tartalmazó, az álmennyezetből kiszertelt és egy hibátlan világítótesten, illetve az ezekből származó LED-eken végeztük.

### 5.1 A mérések típusai

Először in-situ méréseket végeztünk, amelyek során csak az elektromos kontaktusokat készítettük el, de a vizsgált LED-eket a lámpatestben hagytuk (9. ábra). Termikus tranziens tesztelés<sup>[12]</sup> segítségével meghatároztuk a LED lapka és a környezet közötti úgynevezett valós hőellenállás értékét, vagyis az optikai teljesítménnyel való korrekció is megtörtént (lásd később). A nyitott lámpatest esetén az így kapott eredmények a szimulációs modellek pontosítására használhatók.



9. ábra. A kikapcsolt világítótest in-situ mérési elrendezése

Az in-situ méréseket elvégeztük zárt, az álmennyezetre szerelt világítótestben is. Még mindig egyszerre csak 1 LED-et kapcsolunk be, vagyis az így kapott eredmények megadták egyetlen LED tok pn átmenete és a környezet között mérhető valós hőellenállás értékét. Az in-situ méréseket a JEDEC JESD 51-1-es<sup>[12]</sup> és 51-14-es<sup>[13]</sup> szabványoknak megfelelően végeztük el, kiegészítve a LED-ek optikai teljesítmény korrekciójával is (lásd később).

Ha a LED lapka üzemi hőmérsékletet is meg szeretnénk határozni, ahhoz a zárt

lámpatest összes LED-jét be kell kapcsolnunk. Ehhez a mért mintát teljesen kikötöttük az adott szegmensből, és alkalmas ellenállással helyettesítettük azt (10. ábra). Ezután termikus tranziens teszteléssel meghatároztuk a LED üzemi pn átmenet hőmérsékletét<sup>[14], [15]</sup>.



10. ábra. A behacsolt világítótest in-situ mérési elrendezése

Az in-situ mérések elvégzése után a vizsgált LED-eket kisereltük a világítótestből és teljes multi-domain (elektromos, termikus, optikai) karakterizálásnak vetettük alá. Kifejezetten a LED-ek kombinált mérését a JEDEC JESD 51-5x szabványcsalád<sup>[16]-[19]</sup> valamint a CIE 127:2007 és az ennek utódjaként 4 éve publikált 225:2017 jelű műszaki bizottsági jelentés<sup>[20], [21]</sup> írja le. Az eljárással mind a hazai<sup>[22]-[25]</sup>, mind pedig a külföldi<sup>[26]-[28]</sup> irodalom alapos részletességgel foglalkozik illetve a JEDEC szabványok is ingyenesen hozzáférhetőek a szervezet weboldalán történő regisztráció után.

A karakterizálás során megmértük a hőmérséklet érzékeny paramétert (az úgynevezett K-faktor reciprokát), amely a termikus tranziensek kiértékeléséhez is nélkülözhetetlen. A LED-ek lehűlése során valójában azok hőmérsékletfüggő nyitófeszültségét mérjük egy kis értékű, állandó nyitóáram mellett. A nyitófeszültség hőmérsékletfüggésének ismeretében a nyitófeszültség változást át lehet skálázni hőmérsékletváltozássá. Ezt követően elvégeztük a minták teljes izotermikus



11. ábra. A gipszkarton álmennyezetre szerelt és behacsolt világítótest hőmérsékletének és a párhuzamos szegmensek feszültségének mérése (balra); a hiszerelt LED minták 4 vezetékes rögzítése (középen) és termosztált mérése (jobbra)

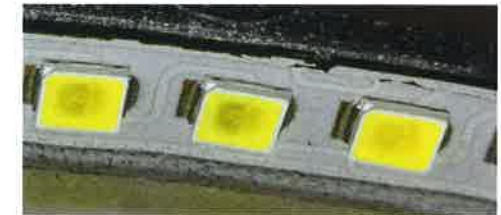
karakterizálását, amely eredményeinek felhasználásával elkészítettük a LED-ek multi-domain áramkör szimulációs modelljeit<sup>[29]-[31]</sup>. A modellek felhasználásával meghatároztuk az in-situ mérések során érvényes sugárzott teljesítmény értékeket, ezek segítségével pedig elvégezhető a fentebb említett optikai teljesítmény korrekció, vagyis a valós hőellenállás meghatározása.

Végül azt vizsgáltuk, hogy az ötosével, soros munkaellenállások mellőzésével párhuzamosan kötött LED-ek nyitóáramai mennyiben térhetnek el egymástól. Ehhez először megmértük az ötös szegmensek nyitófeszültségét, illetve megmértük az adott szegmens mellett a lámpatest hőmérsékletét. Ezután a szegmenseket kisereltük a lámpatestből, majd az adott szegmensnél mért nyitófeszültség és környezeti hőmérséklet mellett megmértük a LED minták nyitóáramát. A mérés menetét és a mérési összeállítást a 11. ábra szemlélteti.

Ennek kapcsán fontosnak tartjuk megjegyezni, hogy ez az elektromos bekötés (több LED egyedi munkaellenállás nélküli párhuzamosan kapcsolása) a tankönyvi mintapéldája annak, hogy hogyan NEM SZABAD a LED tokok elektromos táplálását kialakítani.

### 5.2 A mérésekhez kiválasztott minták

A meghibásodott világítótestben kiválasztottunk egy jó állapotban maradt és jó termikus kontaktussal rendelkező LED mintát, illetve, egy erősen degradálódott, rossz állapotú, de még működőképes LED-et (12. ábra).



12. ábra. Erősen degradálódott, de még működőképes LED-ek a meghibásodott világítótestben

Ugyanebből a világítótestből a párhuzamosíthatóság vizsgálatához egy erősen degradálódott és delaminálódott (a világítótest test fém pereméről felvált) ötös szegmenst is megmértünk (13. ábra).

Az új, még nem használt világítótest esetén arra voltunk kíváncsiak, hogy miként alakulnak a LED-ek üzemi paraméterei azok gyárból kikerült állapotában, ezért az

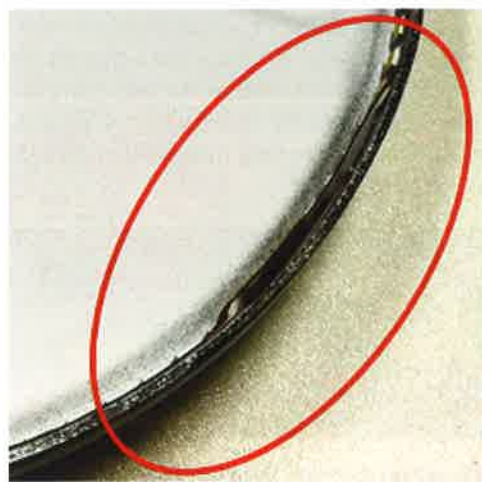


in-situ mérésekhez egy jó termikus kontaktusú LED-et mértünk, a párhuzamosság vizsgálatához pedig 4 db, jól kontaktáló ötös szegmenst választottunk ki (14. ábra).

## 6. A mért és számított eredmények

### 6.1 In-situ mérések

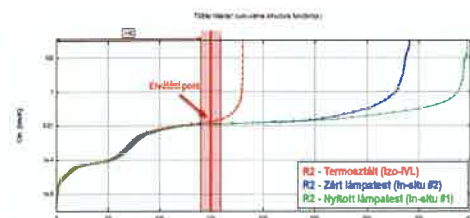
A 15. ábrán a termikus tranziensekből származtatott úgynevezett struktúrafüggvény látható, amely az 1 dimenziós fő hővezetési útvonalat írja le. A koordinátatengely origója maga a LED lapka aktív területe, az ábrán látható aszimptoták pedig a környezetnek, vagyis a végtelen hőnyelőnek felelnek meg, az e kettő közötti görbe pedig a fő hővezetési útvonal hőellen-



13. ábra. Egy erősen degradálódott és delaminálódott ötös szegmens a meghibásodott világítótestben



14. ábra. 4 db, jól kontaktáló ötös szegmens az új világítótestben



15. ábra. A hibás világítótest egy delaminálódott mintájának struktúra-függvényei

állás-hőkapacitás térképét jelenítik meg. Ha valamelyik szerkezeti réteg megváltozik, vagy szándékoltnan lecseréljük azt, akkor a referenciának tekintett szerkezet struktúra függvénye és a vizsgált LED tok struktúra függvénye elválnak<sup>[3]</sup>, mivel az adott szerkezeti részhez tartozó szakasz vízszintes irányban „megnyúlik”, avagy „összeszűroddik”, vagyis az adott szerkezeti rétegben ugyanahhoz a hőkapacitás értékhez arányosan kisebb, vagy nagyobb hőellenállás érték párosul. A struktúrafüggvényből készíthető el a LED tokok úgynevezett kompakt termikus modellje is.

Megjegyzendő, hogy méréseink szerint a lámpatest termikus időállandói legalább egy nagyságrenddel a LED tok + hordozó szalag időállandói fölött vannak, a 15. ábrán látható eredményeket pedig az utóbbinak megfelelő mérési idővel kaptuk, ahol tehát a végtelen hőnyelőnek a lámpatest ház tekinthető.

A meghibásodott világítótestben, jó termikus kontaktus esetén a LED lapkától a hordozó szalag aljáig mért valós hőellenállás értéke kb. 160 K/W, míg a lámpatestig mért valós hőellenállás kb. 200 K/W. Ehhez nagyon közeli értéket sikerült megállapítanunk a gyári, teljesen új világítótest esetén is. Egy delaminálódott LED esetében teljesen más a helyzet (15. ábra); a hordozó szalag aljáig értelmezett hőellenállás itt is hasonló értékű, azonban a lámpatestig tekintett valós hőellenállás drasztikusan megemelkedik, eléri akár a 340 K/W értéket is.



## 6.2 A LED-ek üzemi paramétereit, a multi-domain LED modellek felhasználása

A bekapcsolt lámpatestben lévő LED-ek üzemi paramétereit tehát azok in-situ mérései és multi-domain modelleji segítségével határoztuk meg. A lámpatest különböző pontjai vizsgálhatók ugyan kontakt hőmérséklettel, a LED lapka hőmérsékletének meghatározása azonban ennél jóval összetettebb, köszönhetően a LED-ek erősen hőmérsékletfüggő működésének. A közvetlen és közvetett módon meghatározott értékeket az új lámpatest esetére a 16. ábra szemlélteti.

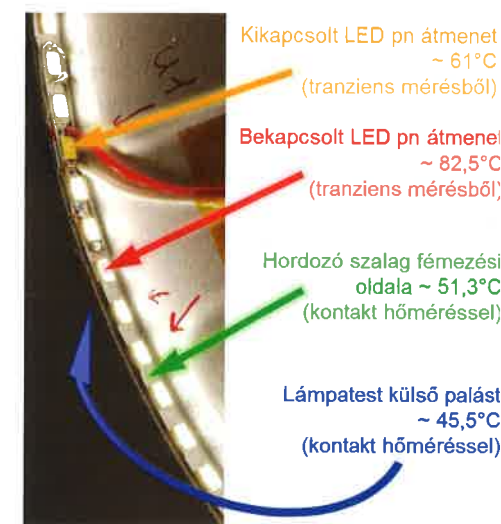
A multi-domain LED modellezés technikai részleteit mellőzve, csak a kapott eredményeket mutatjuk be. Az 1. táblázat egyes sorai a különböző eseteket különítik el: új, vagy használt állapotú LED minta, illetve jó, vagy delaminálódott termikus határfelület. A táblázatban zöld színnel jelöltük a mért értékeket, illetve ide kell sorolni a LED-ek izotermikus karakterisztikáit is. Piros színnel jelöltük a nem egységesen mérhető, de a mérésekből becsülhető értékeket, mint például a LED-ek nyitóáramát, illetve az elméletileg feltételezett értékeket, mint például az új LED minta esetén a megnövekedett hőellenállást. A táblázat kék értékei a szimulációkból kapott működési paramétereket mutatják. Ezeknél az értékeknél fontos megemlíteni, hogy ezen paraméterek közvetlen, in-situ mérése jelenleg nem minden esetben lehetséges, viszont egy multi-domain LED modell segítségével ezek nagy pontossággal meghatározhatók. A táblázatból láthatjuk, hogy a termikus határfelületek degradálódása, vagyis a LED-eket hordozó szalag leválása a LED lapka 15-20 °C-os hőmérséklet emelkedését okozza még a jó állapotú LED tokok esetében is.

A számítások során a pn átmenet – lámpatest hőellenállás (vagyis a palást belső oldalának) referencia hőmérsékletét 59,7 °C-nak tekintettük, mivel a mért minta

esetében ez felel meg a 82,5 °C-os üzemi pn átmenet hőmérsékletnek a teljes 200 K/W-os hőellenállás érték mellett.

## 6.3 A párhuzamosíthatóság vizsgálata

A mérés menetét még egyszer röviden összefoglalva: először megmértük az ötös szegmensek nyitófeszültségeit és az adott szegmens hátoldalán a lemez hőmérsékletét. Ezután a szegmenseket kisereltük a lámpatestből, majd az adott szegmensnél mért nyitófeszültség és talpponti hőmérséklet mellett megmértük az egyes LED minták nyitóáramát.



16. ábra. Az új lámpatesten mért hőmérsékletek

### 1. táblázat: A LED-ek üzemi paramétereit

Minta	$R_{th}$ [K/W]	$T_A$ [°C]	$I_f$ [mA]	$T_j$ [°C]	$P_{di}$ [mW]	$\Phi_s$ [mW]	$\Phi_v$ [lm]	Megjegyzés
R1, használt, jó állapotú	200	59,7	60	83,2	183,6	66,3	21,3	59,7°C-os lámpatestet feltételezve
R1, használt, jó állapotú	200	70	60	93,6	182,7	64,7	20,8	Öregedett, 70°C-os lámpatestet feltételezve
R2, levált, rossz állapotú	340	59,7	60	105,8	180,1	44,5	13,5	59,7°C-os lámpatestet feltételezve
R2, levált, rossz állapotú	340	70	60	118,3	179,6	43,5	13,2	Öregedett, 70°C-os lámpatestet feltételezve
J1, új minta	205	59,7	60	82,5	183,7	72,4	23,1	A mért valós hőellenállással számolva
J1, új minta	340	59,7	60	97,8	182,5	70,4	22,3	Delaminálódott új LED minta szimulációja



ményeinek a termék hosszútávú fényáram-tartására (várható élettartamára) gyakorolt hatásai is. Ilyen módon, az üzemeltetési körülményektől függő várható élettartam adatokat specifikálhat a gyártó, a végfelhasználó pedig tudhatja, hogy egy beltéri világítóttest adott installációja esetében (pl. gipszkarton, vagy fém álmennyezet elemekre szerelve) mekkora a kérdéses világítóttest várható élettartama.

Ilyen, a termikus környezet kialakítására vonatkozó alkalmazástechnikai útmutató gyártó általi közlése és egy ilyen útmutató előírásainak a végfelhasználó általi betartása lehet a kulcsa a LED-es világítóttestek kap-

csán fel-felbukkanó szavatossági viták elkerülésének. Fontos továbbá, hogy az ilyen jellegű alkalmazástechnikai útmutatók ajánlásaira a világítástervezők is a világítóttesteket telepítő szakemberek is figyelemmel legyenek; ezek betartása mind a tervdokumentációkban, mind a kész installációk átadás-átvételi jegyzőkönyveiben dokumentálva legyenek.

### Köszönetnyilvánítás

A vizsgálatokhoz a fény-sűrűségmérő kamerát a MEE Világítástechnikai Társasága biztosította számunkra, amelyet ezúton is hálásan köszönünk.

### IRODALOMJEGYZÉK

- [1] J. Hegedüs, "LED-es lámpatestek többlet energia megta-  
karítási lehetőségei termikus és élettartam szempontokat figyelembe vevő, modell alapú tervezéssel", ELEKTROTECHNIKA, 111(6-7-8): 21-26. (2018)  
<http://www.mee.hu/files/files/et2018-06.pdf#page=21>  
(Legutóbbi hozzáférés: 2021.03.22)
- [2] J. Hegedüs, G. Hantos, "A LED-ekben rejlő lehetőségek: Okos fényforrások", ÉLET ÉS TUDOMÁNY LXXV. : 28. pp. 878-880. , 3 p. (2020)
- [3] J. Hegedüs, "Fénykibocsátó diódák multi-fizikai élettartam modellezése", doktori értekezés, BME (2020)  
<https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/15129>  
(Legutóbbi hozzáférés: 2021.03.22)
- [4] Flir P65 IR kamera  
<https://www.manualslib.com/manual/870129/Flir-Thermacam-P65.html>  
(Legutóbbi hozzáférés: 2021.03.22)
- [5] Canon 450D fény-sűrűségmérő műszer; objektív fókus: 18-50mm; kiértékelő szoftver: LMK Laboratory Soft-ware 4, <http://www.technoteam.de>  
(Legutóbbi hozzáférés: 2021.03.22)
- [6] A. Poppe, M. Rencz, G. Hantos, J. Hegedüs, G. Farkas, L. Gaál, "Virtual Prototyping of LED Applications through Multi-Domain Models of LED Packages: The "Industry 4.0"-Like Approach of the Delphi4LED Project", In: Proc. of the VII. IEEE Lighting Conference of the Visegrad Countries LUMEN V4, 18-20 September 2018, Třebíč, Czech Republic, pp. 91-94., doi: 10.1109/LUMENV.2018.8521026
- [7] A. Poppe, "Industry 4.0" Approach to LED luminaire design: as developed and proposed by the Delphi4LED H2020 ECSEL project (LED-es lámpatest tervezés "Ipar 4.0" megközelítésben: ahogy a Delphi4LED H2020 ECSEL projektben kifejlesztettük és javasoljuk), meghívott előadás, Lux et Color Vespremiensis konferencia, Veszprém, 2018. október 11.
- [8] A. Poppe, "Ipar 4.0 szerű folyamat LED-es lámpatestek tervezésére: a Delphi4LED projekt legújabb eredményei", In: Némethné dr. Vidovszky, Ágnes; Poppe, András (szerk.) Világítástechnikai Évkönyv 2018-2019, Budapest: MEE



- Világítástechnikai Társaság, 2019 pp. 83-89 [https://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/VTT\\_Evkonyv2018-2019\\_Poppe\\_Delphi4LED.pdf](https://www.eet.bme.hu/~poppe/MTMT-DOCs/VTT_Evkonyv2018-2019_Poppe_Delphi4LED.pdf)  
(Legutóbbi hozzáférés: 2021.03.22)
- [9] A. Poppe, G. Farkas, L. Gaál, G. Hantos, J. Hegedüs, M. Rencz, "Multi-domain modelling of LEDs for supporting virtual prototyping of luminaires", ENERGIES, 2019, 12(10), 1909, DOI:10.3390/en12101909
- [10] A. Poppe, B. Robin, G. Hantos, J. Hegedüs, "Virtual prototyping of LED products across the supply chain speeds development - Part 1", In: LEDS MAGAZINE 16 (2019) pp. 21-24.
- [11] A. Poppe, B. Robin, G. Hantos, J. Hegedüs, "Virtual prototyping of LED products across the supply chain speeds development - Part 2", In: LEDS MAGAZINE (2019) pp. 14-16.
- [12] JEDEC JESD51-1 Standard "Integrated Circuit Thermal Measurement Method - Electrical Test Method" (1995)  
<http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/jesd51-1.pdf>  
(Legutóbbi hozzáférés: 2020.03.20.)
- [13] JEDEC JESD51-14 Standard "Transient Dual Interface Test Method for the Measurement of the Thermal Resistance Junction-To-Case of Semiconductor Devices with Heat Flow Through a Single Path" (2010)  
[http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-14\\_1.pdf](http://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-14_1.pdf)  
(Legutóbbi hozzáférés: 2020.03.20.)
- [14] G. Hantos, J. Hegedüs, "K-factor calibration issues of high power LEDs", In: Proc. of the 23rd THERMINIC Workshop, 27-29 September 2017, Amsterdam, Netherlands, pp. 182-187  
DOI: 10.1109/THERMINIC.2017.8233798
- [15] G. Hantos, J. Hegedüs, A. Poppe, "Different questions of today's LED thermal testing procedures", In: Proc. of the 34th IEEE SEMI-THERM Symp., 19-23 March 2018, San Jose, USA, pp. 63-70 DOI:10.1109/SEMI-THERM.2018.8357354
- [16] JEDEC JESD51-50 Standard "Overview of Methodologies for the Thermal Measurement of Single- and Multi-Chip, Single- and Multi-PN Junction Light-Emitting Diodes (LEDs)" (2012)  
<https://www.jedec.org/system/files/docs/JESD51-50.pdf>  
(Legutóbbi hozzáférés: 2020.03.20.)
- [17] 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>  
(Legutóbbi hozzáférés: 2020.03.20.)
- [18] 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>  
(Legutóbbi hozzáférés: 2020.03.20.)
- [19] JEDEC JESD51-53 Standard "Terms, Definitions and Units Glossary for LED Thermal Testing" (2012)  
<https://www.jedec.org/system/files/docs/JESD51-53.pdf>  
(Legutóbbi hozzáférés: 2020.03.20.)
- [20] "Measurement of LEDs", CIE 127:2007 Technical Report (ISBN 978 3 901 906 58 9)  
<http://cie.co.at/publications/measurement-leds>  
(Legutóbbi hozzáférés: 2020.03.20.)
- [21] "Optical measurement of high-power LEDs", CIE 225:2017 Technical Report (ISBN 978-3-902842-12-1), DOI: 10.25039/TR.225.2017, <http://cie.co.at/publications/optical-measurement-high-power-leds>  
(Legutóbbi hozzáférés: 2020.08.26.)

- [22] A. Poppe, "Félvezető eszközök multi-domain karakterizációja", Akadémiai doktori értekezés, 2017 szeptember, Budapest, <http://real-d.mtak.hu/id/eprint/1053> (Legutóbbi hozzáférés: 2020.08.26.)
- [23] Kovács Z., Marosy G., Poppe A., "LED-es közvilágítási lámpatestek termikus tranziens teszteléssel való diagnosztikai vizsgálatának lehetőségei", ELEKTROTECHNIKA 104(9) pp. 30–36, (2011) <http://www.mee.hu/files/images/files2/u9/Elektrotechnika-2011-09.pdf#page=28> (Legutóbbi hozzáférés: 2020.03.20.)
- [24] Temesvölgyi T., Farkas G., Poppe A., "AC LED-ek termikus impedanciájának mérése", ELEKTROTECHNIKA 104(7-8):10-14. (2011) <http://www.mee.hu/files/images/files2/u9/Elektrotechnika-2011-07-08.pdf#page=12> (Legutóbbi hozzáférés: 2020.03.20.)
- [25] Poppe A., "Teljesítmény LED-ek új termikus mérési szabványai", In: Barkóczi G., Bolvári G., Dr Szabó F. (szerk.), Világítástechnikai Évkönyv 2012-2013: A fény és élettani hatásai, 208 p. Budapest: MEE Világítás-technikai Társaság, 2012. pp. 96-102, <http://www.vilagitas.org/stuff/evkonyv/2012-2013/Led/Poppe%20Andras%20-%20Teljesitmeny%20LED-ek%20uj%20termikus%20meresi%20szabvanyai.pdf> (Legutóbbi hozzáférés: 2020.03.20.)
- [26] 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, DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625227
- [27] V. Székely, T. van Bien, "Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: a measurement and identification method", SOLID-STATE ELECTRONICS 31(9): 1363-1368 (1988) DOI: 10.1016/0038-1101(88)90099-8
- [28] A. Poppe, G. Molnár, T. Temesvölgyi, "Temperature dependent thermal resistance in power LED assemblies and a way to cope with it", In: Proc. of the 26th IEEE SEMI-THERM Symp., 21-25 February 2010, Santa Clara, USA, pp. 283-288, DOI: 10.1109/STHERM.2010.5444276
- [29] 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
- [30] A. Poppe, G. Farkas, L. Gaál, G. Hantos, J. Hegedüs, M. Rencz, "Multi-domain modelling of LEDs for supporting virtual prototyping of luminaires", ENERGIES, 2019, 12(10), 1909, DOI:10.3390/en12101909
- [31] J. Hegedüs, G. Hantos, R. Bornoff, M. Rencz, A. Poppe, "Implementation of a multi-domain LED model and its application for optimized LED luminaire design", In: Proc. of the 35th SEMI-THERM Symp., 18-22 March 2019, San Jose, USA, pp. 12-17