

Hegedüs János, Dr. Poppe András

## Közvilágítási lámpatestek karakterizálása: multi-domain LED-modellekkel – a LED-karakterisztikáktól a lámpatest üzemi fényáramáig

A teljesítmény LED-ek működése jelentős mértékben függ pn-átmenetük hőmérsékletétől, ez a függés azonban konzisztens mérési és modellezési technikákkal jól tervezhető paraméterré válik. Alkalmos modell segítségével az adott elektromos és termikus környezet is figyelembe véve meghatározható a mindenkori üzemi fényáram, akár összetettebb rendszerek, mint pl. teljes közvilágítási lámpatestek, esetén is. Jelen cikkünkben olyan áramkör-szimulációs programokban is implementálható multi-domain LED-modelleket mutatunk be, amely konzisztens módon írja le az elektromos, termikus és optikai paraméterek egymásra hatását, ezáltal támogatva a tervezői munkát. A validált szimulációs modellekkel egyszerűen vizsgálható pl. az, hogy ugyanabba a termikus környezetbe (lámpatest, hűtőborda) szerelt különböző LED-típusok hogy viselkednek, beleértve a LED-ek élettartam alatti öregedésének a hatását is.

*Operation of power LEDs is significantly influenced by the pn-junction temperature; this temperature dependent nature of the LEDs though, could be well characterised by proper measuring and modelling techniques. The appropriate device model should consider the given electrical and thermal design in order to predict the so called "hot lumens" even in case of complex mechanical structures, such as streetlighting luminaires. In this article we present a chip-level multi-domain LED model that can be implemented in Spice-like circuit simulators and considers the strong interactions between the operating parameters belonging to the electrical, optical and thermal domains consistently, thereby supporting the design work. The verified simulation models enable further investigations, e.g. with different LED types within the same thermal environment (luminaire or heatsink), even counting with parameter degradations during the elapsed operating life time of the LEDs.*

### 1. BEVEZETÉS

A félvezető alapú eszközök működését az aktív réteg hőmérséklete jelentős mértékben befolyásolja; a hőmérséklet és az elektromos paraméterek egymásra hatása nem elhanyagolható, ezek csak együttesen vehetőek figyelembe. Teljesítmény LED-ek esetében azonban az elektromos és a termikus paraméterek az optikai tulajdonságokkal is szoros csatolásban vannak, emiatt a három említett fizikai tartomány egymásra hatása csak egy ún. multi-domain modell segítségével írható le. Egy ilyen modell fontos szimulációs bemenetként szolgálhat a lámpatestek tervezése során; pl. segítségével ellenőrizhető, hogy extrém körülmények között is eléri-e

üzemi fényáramuk a megkövetelt minimális értéket. Ennek során figyelembe kell venni a LED-ek ún. *energiakonverziós hatásfokának* és *fényhasznosításának* az eltelt üzemidővel arányos romlását, degradálódását is<sup>1</sup>. Az elhasználódás tervezési időben történő szimulációja szintén fontos és hasznos információ lehet, hiszen a szükséges karbantartások és az eszköz esetleges cseréjének költségei befolyásolhatják a tervezés közbeni, vagy akár a későbbi kivitelezés gazdasági megfontolásait is.

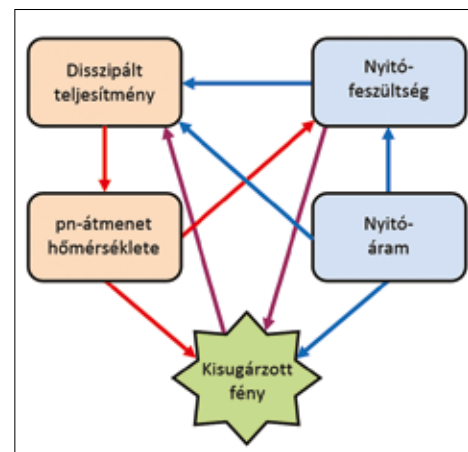
A továbbiakban egy kereskedelmi forgalomban is kapható, nagy teljesítményű LED-minta öregedését kívánjuk leírni egy olyan, már korábban bemutatott multi-domain LED-model segítségével, amely beilleszthető mind elektromos áramkör-szimulációs programokba (pl. Spice), mind pedig az ún. CFD-*(computational fluid dynamics)* alapú termikus szimulációs programokba (pl. FloEFD [1]).

## 2. LED-EK MULTI-DOMAIN ÁRAMKÖR-SZIMULÁCIÓS MODELLJE

### 2.1. LED-ek elektromos, termikus és optikai karakterizálása

A LED-ek multi-domain leírását az eszköz működési paramétereinek erős pn-átmenet hőmérsékletfüggése teszi szükségessé. Az 1. ábra szemlélteti egy LED elektromos, termikus és optikai paramétereinek egymásra hatását; a kisugárzott teljesítmény és a nyitófeszültség értéke, és ezáltal (áramgenerátoros meghajtást feltételezve) a disszipált hőteljesítmény is függ a pn-átmenet hőmérsékletétől. A pn-átmenet környezethez képesti hőmérséklet-emelkedését azonban a konstansnak tekintett hőellenállás és az előbb említett disszipált teljesítmény szorzata határozza meg.

Konzisztens, más LED-típusokkal való összevetésre is alkalmas mérési és szimulációs eredmények emiatt csak úgy érhetőek el, ha az eszköz (tokozott LED vagy LED-tok) karakterizációjának alapja nem a környezeti hőmérséklet, hanem a komplex működést leginkább meghatározó pn-átmenet hőmérséklet. Ez azonban speciális mérési eljárást tesz szükségessé, amelyben kombináljuk a LED-ek optikai és termikus méréseit. Az ilyen kombinált mérési eljárással számos hazai [2]-[5] és külföldi [6]-[8] irodalom is foglalkozik. A LED-tokok kombinált termikus és radiometriai/fotometriai mérésére vonatkozó első nemzetközi ajánlás a 2012-ben publikált JEDEC JESD 51-5x termikus mérésekkel foglalkozó szabványcsalád [9]-[12]. A LED-ek optikai mérésével kapcsolatos, jelenlegi ajánlásokat a mára már valamelyest túlhaladott CIE 127-2007-es dokumentum [13] tartalmazza. Ezt várhatólag



**1. ábra** LED-ek működési paramétereinek egymásra hatása a különböző fizikai tartományokban

<sup>1</sup> Gyakran megfigyelt jelenség az, hogy egy LED üzemidejének első pár száz órájában nő az összfényáram; értelemszerűen ezt nem kell kompenzálni, csak a később bekövetkező összfényáram-csökkenést.

felváltja a CIE TC2-63-as munkabizottsága által kidolgozott, elfogadás és publikáció előtt álló „Nagyteljesítményű LED-ek Optikai Mérése” című dokumentum, amely önálló fejezetet szentel a pn-átmenet hőmérséklet pontos beállítása, ill. meghatározása kérdésének.

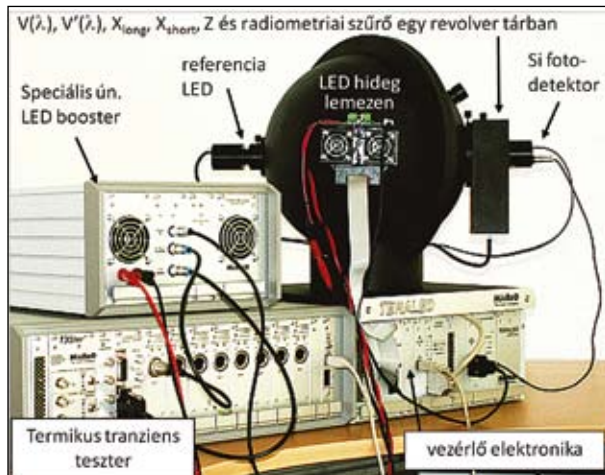
A 2. ábrán látható, Magyarországon kifejlesztett műszer-együttes segítségével a LED-ek multi-domain paramétereinek mérése teljesen automatizált módon végezhető el, a fent említett szabványoknak (JEDEC JESD51-51, 51-52) megfelelően.

### 2.2. A multi-domain modell részei

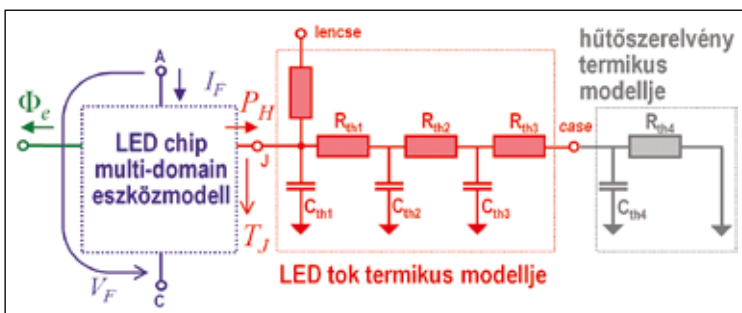
A LED-ek multi-domain modelljeinek [5], [6], [14] – [20] alapja egy olyan áramkör-szimulátorba illeszthető modell, amely lehetővé teszi a LED chip hőmérsékletfüggő nem lineáris elektromos karakterisztikájának, a LED-tok termikus viselkedésének és a LED fénykibocsátásának az egyidejű szimulációját. Egy ilyen modell struktúráját a 3. ábra szemlélteti.

E szerint célszerű a LED-tok termikus viselkedését a LED-lapka (chip) modelljétől elválasztható termikus RC hálózat formájában megadni. Egy ilyen hálózati modell a LED-tok termikus tranziens méréséből meghatározható [3], [4], [5].

A világítódiodák pn-átmenetében végbemenő radiatív, illetve disszipatív rekombinációk során fotonok és fononok egyaránt keletkeznek; ennek megfelelően a félvezető lapka fényt bocsát ki és melegszik is. Ennek értelmében egy LED belső pn-átmenetét úgy tekinthetjük, mintha azt két párhuzamosan kapcsolt dióda alkotná: az egyik csak fényt bocsát ki, mintha az egy 100%-os hatásfokú LED lenne, a másik pedig csak disszipál, azaz melegíti a LED-lapkát. Az így különválasztott két dióda külön-külön modellezhető a legtöbb



**2. ábra** Teljesítmény LED-ek kombinált elektromos, optikai és termikus karakterizálására szolgáló műszer-együttes. Az automatizált mérések a JEDEC JESD51-5x szabványcsaládnak megfelelően végezhetőek



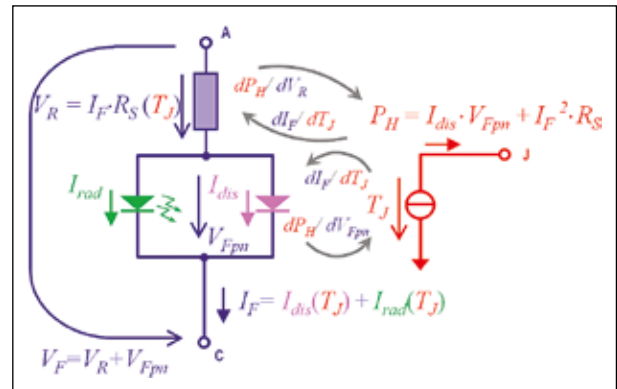
**3. ábra** Egy tokozott LED multi-domain szimulációs modelljének vázlata.  $I_F$  a teljes nyitóáramot,  $V_F$  a LED külső kapcsai közt mérhető nyitófeszültséget,  $T_J$  a lapkahőmérsékletét,  $\Phi_e$  az emittált optikai teljesítményt,  $P_H$  pedig a LED disszipációját jelöli

áramkör-szimulációs programban megtalálható ún. *Shockley dióda modellel*.

A korszerű, nagy teljesítményű LED-ek növekvő nyitóárama szükségessé teszi a meghajtó generátor és a pn-átmenet közé eső ellenállás (forrasztások, LED-tokon belüli intermetallikus rétegek, huzalkötések, a félvezető lapka gyengébben adalékolt területei stb.) figyelembevételét is; ezt az ún. belső dióda fent leírt elektromos modelljével sorosan kapcsolt ellenállással modellezzük. A meghajtóáram ( $I_F$ ) következtében a soros ellenálláson feszültség esik ( $V_R$ ), emiatt a tok külső kapcsain ( $V_F$ ) és a belső pn-átmeneten ( $V_{Fpn}$ ) eső feszültségek eltérnek egymástól.

A soros ellenállás és a belső dióda együttes disszipációját, mint hőforrást egy áramgenerátorral modellezhetjük, amelynek „árama” megegyezik a számított  $P_H$  disszipációval<sup>2</sup>. Ehhez a hőforráshoz (áramgenerátorhoz) kapcsolódik a LED-tok és a hűtőszerezvény termikus modellje; ezek együttesen határozzák meg a pn-átmeneten kialakuló hőmérsékletet ( $T_J$ ).

Az így kapott elektro-termikus modellt a 4. ábra szemlélteti.



**4. ábra** Egy elektro-termikus áramkör-szimulációs programba építhető LED-lapka modell topológiája és legfontosabb ágjellemzői

### 2.3. Az áramköri modellparaméterek meghatározása

A LED-ek pn-átmenetének hőmérséklete meghatározó paraméter, ezért egy LED-modell létrehozásához az eszköz ún. izotermikus  $I_F$ - $V_F$ - $\Phi_e$  karakterisztikáinak ismerete szükséges. Amennyiben ez több különböző pn-átmenet hőmérsékleten is ismert, úgy a modell egyes paramétereinek hőmérsékletfüggése meghatározható. A multi-domain LED-modell paramétereinek meghatározását a kapcsolódó szakirodalom ([5], [14], [16], [17], [18], [19]) részletesen taglalja. Röviden, a modellt leíró főbb egyenletek a paraméterezés sorrendjében a következők:

$$V_{Fpn} = V_F - I_F \cdot R_S \quad (1)$$

ahol  $V_{Fpn}$  a belső pn-átmenetre eső nyitófeszültség,  $V_F$  a LED külső kapcsaira kerülő nyitóirányú feszültség,  $I_F$  a nyitóáram,  $R_S$  pedig a soros ellenállás. A soros ellenállás értéke meghatározható, mint az izotermikus  $I_F$ - $V_F$  görbe nagyáramú szakaszának meredeksége.

<sup>2</sup> Termikus rendszerek modellezésénél kihasználjuk az elektromos és termikus rendszerek közötti analógiát. Az elektro-termikus képességekkel rendelkező áramkör-szimulációs programok minden alkatrészről és áramköri csomóponttól nyilvántartják, hogy azok elektromosak-e vagy termikusak-e, és ennek alapján tudják, hogy a reájuk jellemző fizikai mennyiségeknek mi a helyes mértékegysége, pl. egy termikus „áramgenerátor” egy hőforrást reprezentál, az „árama” a  $W$ -ban mért hőáram, disszipáció.

A félvezető diódák elméletéből ismert, hogy áramgenerátoros meghajtás esetén a pn-átmenet nyitófeszültsége növekvő hőmérséklettel csökken. A nyitófeszültség ilyen megváltozása tág hőmérsékleti határokon belül egy lineáris közelítéssel pontosan leírható:

$$V_{Fpn}(I_{F0}, T_J) = V_{Fpn_0} + S_{VFpn} \cdot (T_J - T_{J0}) \quad (2)$$

ahol  $I_{F0}$  a LED pn-átmenetére kényszerített ismert nyitóáram,  $V_{Fpn}$  a nyitófeszültségnek az ezen áram mellett egy (tetszőlegesen megválasztott)  $T_{J0}$  referencia hőmérsékleten mért értéke,  $S_{VFpn}$  a nyitófeszültség-változás hőmérsékleti együtthatója. Egyetlen pn-átmenet esetében  $S_{VFpn}$  -1,5 mV/°C... -2 mV/°C körüli, konkrét értéke függ a pn-átmenetet alkotó félvezető anyag tiltott sáv szélességétől és az átmenetre kényszerített nyitóáramtól is.

A radiatív áramösszetevő meghatározása a kisugárzott optikai teljesítményből a következőképpen lehetséges:

$$I_{rad} = \frac{\Phi_e}{V_{Fpn}} \quad (3)$$

ahol  $I_{rad}$  a radiatív áramösszetevő,  $\Phi_e$  pedig a LED által kisugárzott teljes optikai teljesítmény. Az  $I_{dis}$  disszipatív áramösszetevő ezek után a teljes nyitóáram ismeretében a következőképpen számolható:

$$I_{dis}(V_{Fpn}) = I_F - I_{rad}(V_{Fpn}) \quad (4)$$

A párhuzamosan kapcsolt, tisztán disszipatív és radiatív diódák leírhatóak a Shockley modell segítségével:

$$I_{dis}(V_{Fpn}) = I_{0\_dis} \cdot \left[ \exp\left(\frac{V_{Fpn}}{(m_{dis} \cdot V_T)}\right) - 1 \right] \quad (5)$$

$$I_{rad}(V_{Fpn}) = I_{0\_rad} \cdot \left[ \exp\left(\frac{V_{Fpn}}{(m_{rad} \cdot V_T)}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

ahol  $I_{0\_dis}$  és  $I_{0\_rad}$  az ún. szaturációs áram,  $m_{dis}$  és  $m_{rad}$  az ún. idealitási faktor,  $V_T = kT/q$  pedig az ún. termikus feszültség (szobahőmérsékleten kb. 26 mV); ahol  $k$  a Boltzmann-állandó,  $T$  a pn-átmenet abszolút hőmérséklete,  $q$  pedig az elemi töltés.

Az idealitási faktorok hőmérsékletfüggése lineáris egyenletekkel modellezhető:

$$m_{dis}(T_J) = m_{dis}(T_{ref}) + S_{m\_dis} \cdot (T_J - T_{ref}) \quad (7)$$

$$m_{rad}(T_J) = m_{rad}(T_{ref}) + S_{m\_rad} \cdot (T_J - T_{ref}) \quad (8)$$

ahol  $T_{ref}$  egy referencia hőmérséklet,  $T_J$  pedig az aktuális pn-átmenet hőmérséklet,  $S_{m\_dis}$  és  $S_{m\_rad}$  a hőmérsékleti együtthatók.

A szaturációs áram hőmérsékletfüggése:

$$I_0(T_J) = I_{0ref} \cdot \left( \frac{T_J}{T_{ref}} \right)^{p_t / m(T_J)} \cdot \exp\left( \frac{V_g(T_J)}{m(T_J) \cdot V_T} \cdot \frac{T_J \cdot T_{ref}}{T_{ref}} \right) \quad (9)$$

ahol  $I_{0ref}$  a referencia hőmérsékleten vett áramegyüttható,  $m$  a hőmérsékletfüggő idealitási faktor,  $p_t$  dióda modellparaméter,  $V_g$  pedig a tiltott sáv szélessége potenciába kifejezve.

Az  $E_g$  tiltott sáv szélesség (vagy potenciában kifejezve:  $V_g$ ) meghatározható a LED relatív spektrális teljesítmény eloszlásából, a  $\lambda_p$  csúcshullámhossz ismeretében:

$$V_g = \frac{E_g}{q} \quad (10)$$

$$E_g = \frac{c \cdot h}{\lambda_p} \quad (11)$$

$$E_g(T) = E_{g0} - \frac{\alpha \cdot T^2}{\beta + T} \quad (12)$$

ahol  $E_{g0}$  a sáv szélesség referencia értéke,  $c$  a fény sebessége vákuumban,  $\lambda_p$  a csúcshullámhossz értéke,  $\alpha$  és  $\beta$  pedig illesztési paraméterek. A hőmérsékleti függést is leíró (12)-es egyenlet az ún. Varshni formula néven is ismert [16].

A LED fotopos összfényárama kiszámítható a kisugárzott optikai teljesítményből:

$$\Phi_v = K \cdot \Phi_e \quad (13)$$

ahol  $\Phi_v$  a fotopos összfényáram,  $K$  pedig a CIE Nemzetközi Világítástechnikai Szótárában (ILV) definiált ún. *sugárzás fényhasznosítása (luminous efficacy of radiation)* [21]. A kisugárzott optikai teljesítmény ismeretében az összfényáram hőmérséklet- és nyitóáram függése egy lineáris összefüggéssel közelíthető:

$$\Phi_v = [K_0 + \alpha_T \cdot (T_J - T_{J0}) + \alpha_I \cdot (I_F - I_{F0})] \cdot \Phi_e \quad (14)$$

ahol  $K_0$  a sugárzás fényhasznosításának a  $T_{J0}$  referencia (lapka) hőmérsékleten mért értéke,  $\alpha_T$  és  $\alpha_I$  a  $K$  lineáris hőmérséklet- és áramfüggését leíró együtthatók. A kisugárzott optikai teljesítmény értéke közvetlenül számítható a modellparaméterekből úgy, mint

$$\Phi_e = I_{rad} \cdot V_{Fpn} \quad (15)$$

amely a (3)-as egyenlet átrendezéséből adódik.

Megemlítendő, hogy fehér LED-ek esetén a fénypor ún. *fénykonverziós hatásfokának* figyelembevétele a teljes nyitóáram disszipatív, illetve radiatív összetevőkre bontásával automatikusan megtörténik; úgy modellezzük, mintha a pn-átmenet energiakonverziós hatásfoka kisebb lenne. Ez fizikailag ugyan nem helytálló, azonban a fénypor által elnyelt, majd veszteségi hőként távozó teljesítmény nagyjából a fő hővezetési útvonalon keresztül jut el a környezetbe, így az továbbra is a félvezető lapkát melegíti. A legfrissebb szimulációs vizsgálatok kimutatták, hogy ez a modell csak ún. vékony, kontakt fényporréteggel készített fehér LED-ek esetében helytálló [22]. Abban az esetben, amikor a rossz hővezető képességű fényporréteg vastagabb, vagy a félvezető lapkától távolabb helyezkedik el, a fényporban bekövetkező veszteséget és a fényporréteg hőmérsékletét külön kell számolni, modellezni. Ez további kutatásaink egyik iránya.

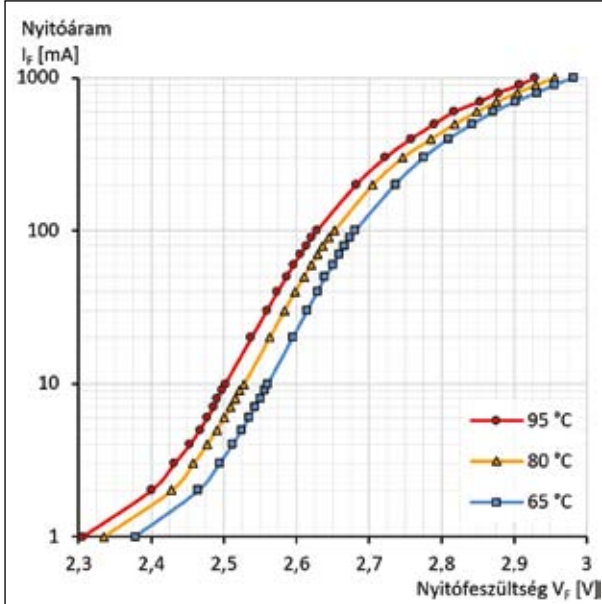
### 3. A MODELL ILLESZTÉSE VALÓS LED MÉRÉSI EREDMÉNYEKRE

Az eszköz öregedését is figyelembe vevő multi-domain LED-modell bemutatásához egy Luxeon Z LED-mintát választottunk. A szükséges méréseket elvégeztük az eszköz új és öregített állapotában is, a 2. ábrán bemutatott összeállítás segítségével. Az öregítés az IES LM-80-08 szabványnak [23] megfelelően történt. Az alábbiakban a modellparaméterek illesztésének gyakorlati vonatkozásait taglaljuk.

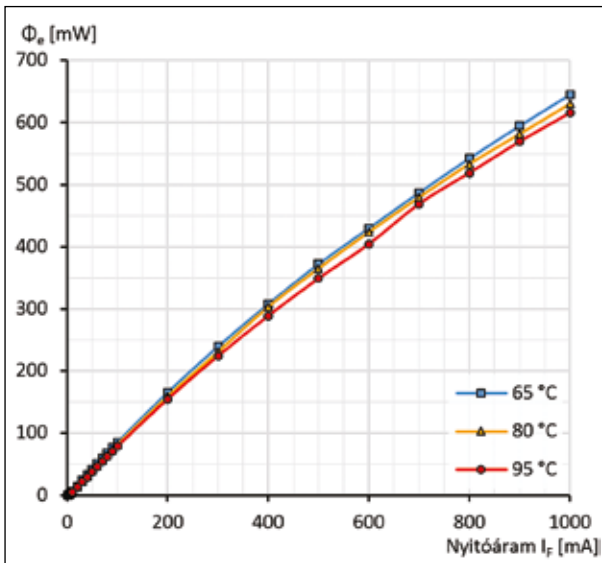
Az eszköz izotermikus  $I_F$ - $V_F$ - $\Phi_e$  karakterisztikáját három különböző pn-átmenet hőmérsékleten mértük meg, a kapott görbék az 5. ábra mutatja be. Az eredmények jól szemléltetik a (2) egyenletnél leírtakat; az  $S_{VFpn}$  kis áramokon (~3 mA ... 5 mA) mért -2 mV/°C körüli értéke az áram növekedésével csökken ( $I_F = 1$  A értéknél már -1,7 mV/°C).



A kapott görbéken jól látható a kisáramú szakaszokon (~1 mA ... 5 mA) a többletáram hatása, amelynek modellezése szükségtelenül bonyolulttá tenné az eszköz későbbi, nagyáramú üzemi körülményeinek szimulációját (ahol ugyanis elektro-termikus szimulációra is szükség van a magas diszzipáció miatt). Emiatt ezt a jelenséget az itt leírt LED-modell nem tükrözi [16].



**5. ábra** A Luxeon Z meleg fehér LED izotermikus  $I_F$ - $V_F$  karakterisztikái, különböző pn-átmenet hőmérsékleteken mérve, logaritmus 'y' skálán ábrázolva

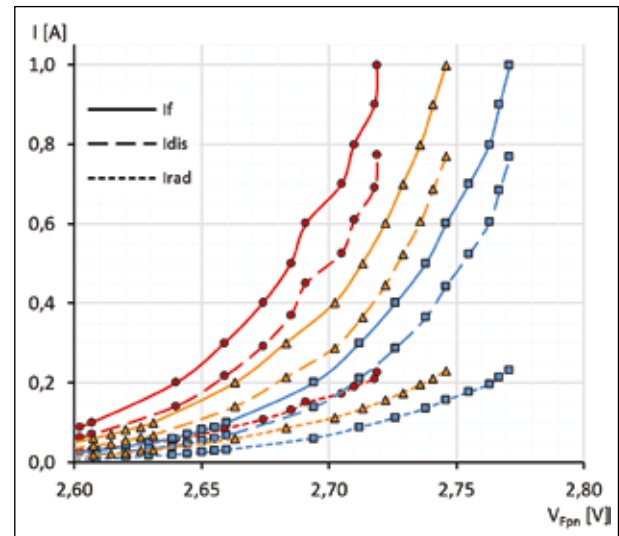


**6. ábra** A Luxeon Z melegfehér LED izotermikus  $I_F$ - $\Phi_e$  karakterisztikái, különböző pn-átmenet hőmérsékleteken mérve

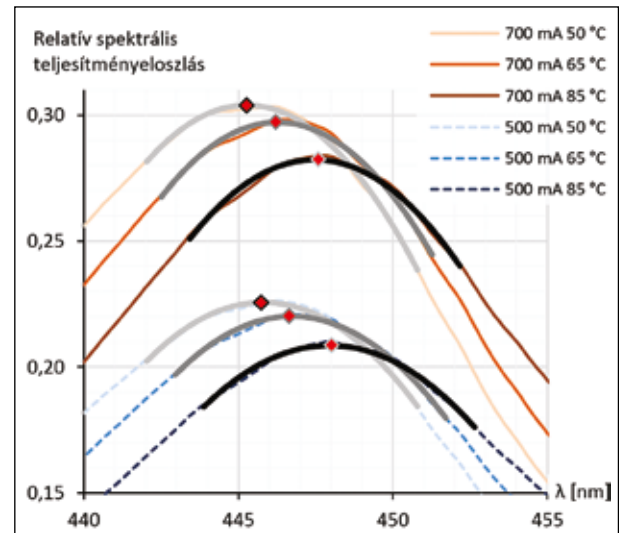
Az ideális Shockley modell exponenciális jellegétől a valós, mért karakterisztikák a nagyáramú tartományban (> 100 mA) a soros ellenállás hatására térnek el egyre inkább. A soros ellenállás meghatározható úgy, mint az ideális görbétől való feszültségben mért eltérés és a hozzá tartozó áram hányadosa, avagy, mint a nagyáramú tartomány meredeksége. Úgyelni kell azonban arra, hogy már a közepes áramtartományokhoz illesztett Shockley modell is terhelt a soros ellenállás hatásától, valamint, hogy a nagyáramú tartomány meredekségében is megjelenik a dióda exponenciális karakterisztikája. Az ilyen módszerekkel meghatározott  $R_S$  soros ellenállás értéke tehát

hibával terhelt, azonban jó bemeneti kezdőértékként szolgálhat egy automatizált paraméterillesztő algoritmus számára; a pontos  $R_S$  érték, mint a modell többi paramétere is, globális görbeillesztéssel határozható meg. Az  $R_S$  soros ellenállás ismeretében a teljes karakterisztikára meghatározható a belső pn-átmenetre eső  $V_{Fpn}$  feszültség értéke az (1) egyenlet alapján.

Az izotermikus nyitóáram ( $I_F$ ) – kisugárzott teljesítmény ( $\Phi_e$ ) görbék (lásd a 6. ábrán) a nyitóáram – nyitófeszültségmérésekkel egyidejűleg felvehetőek, a 2. ábrán bemutatott elrendezéssel akár teljesen automatizáltan is. A kisugárzott optikai teljesítmény ismeretében a (3) és (4) egyenletek segítségével meghatározhatók a teljes nyitóáram disszipatív, illetve radiatív áramkomponensei. Az így kapott görbesereget a 7. ábra szemlélteti (az ábra lapkahőmérsékletek szerinti színezési sémája megegyezik az 5., ill. 6. ábrákon alkalmazottal; a mérési adatpontok összekötése az áramösszetevők szerinti megkülönböztethetőséget szolgálja).



**7. ábra** A Luxeon Z LED mérésekből meghatározott áramösszetevői 95 °C, 80 °C és 65 °C lapkahőmérsékleteken



**8. ábra** A Luxeon Z LED minta különböző lapkahőmérsékleteken és nyitóáramokon mért relatív spektrális teljesítményeloszlásainak csúcsai

A paraméterezés következő lépése az (5)–(9) egyenletek szerinti hőmérsékletfüggések meghatározása. Ez a LED-ek különböző lapkahőmérsékleteken és nyitóáramokon mért relatív spektrális teljesítményeloszlása és a Varshni formula

(12) segítségével lehetséges. A 8. ábrán az ehhez szükséges görbesereg látható; a mérési bizonytalanság csökkenthető a görbék maximumhelyeinek négyzetes közelítésével. Az ábrán piros rombuszok jelölik a maximum pontokat.

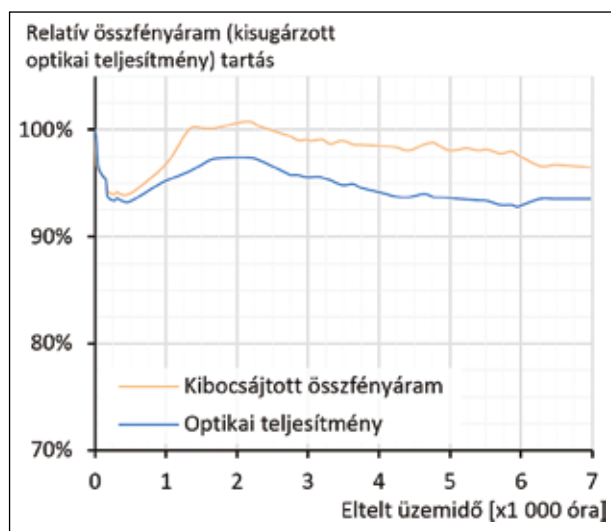
A további modellparaméterek meghatározása ezután globális görbeillesztéssel (optimalizációval) történik.

#### 4. TELJESÍTMÉNY LED-EK ÖREGEDÉSE

LED-ek öregedésének vizsgálatára kidolgozott szabványok adnak ajánlást, ezek közül a legáltalánosabban elterjedt eljárás az IES LM-80-08 [23] (a szabadon elérhető leírást lásd: [24]). A szabvány legalább 6000 órás öregítést ír elő a dokumentumban jól meghatározott öregítési környezetben, amelynek során legalább 1000 óránként kell adatgyűjtést végezni a kritériumoknak megfelelő tesztberendezésekkel. A mért adatok általában a LED-minták összfényáramára, esetleg kisugárzott teljesítményére terjednek ki. Az eltelt üzemidő függvényében vett fényáramtartás a TM-21-es szabvány [25] segítségével időben tovább extrapolálható, amelynek ajánlott hossza a minták számától és az öregítés során eltelt időtől függ.

A korábban említett Lumileds Luxeon Z LED mintákat 9000 órás öregítésnek vetettük alá, amelyet a szabványnak megfelelő kamrában, 85 °C környezeti hőmérsékleten és 1 A nyitóáram mellett végeztünk el. A teszt során rögzített kibocsátott összfényáram és optikai teljesítménygörbék a 9. ábrán láthatóak.

Az LM-80-08 szabvány azonban csak a minták adott körülmények közötti fénykibocsátását és az esetleges meghibásodások számának figyelését írja elő, az egyéb paraméterek változásával nem foglalkozik. Emiatt az öregítési eljárás során néhány minta teljes, kombinált termikus és optikai mérését is elvégeztük, a mérések során a pn-átmenet hőmérsékletét ismert, konstans értékeken tartva.



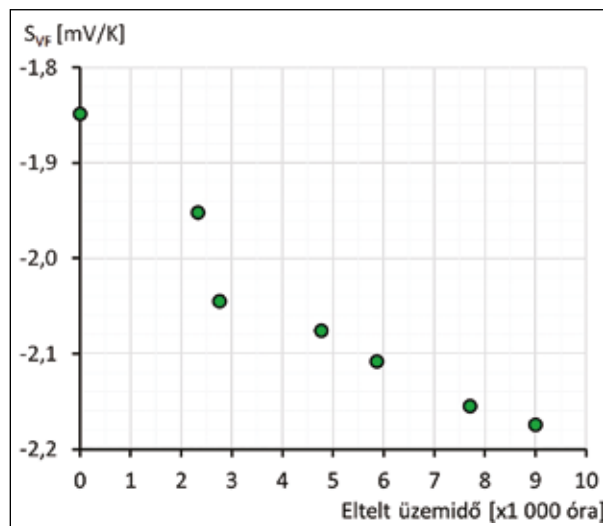
9. ábra Lumileds Luxeon Z LED minták LM-80-08 ajánlás szerinti öregítés során mért fény(áram)tartása az öregítés első 7000 órájára

Az elektromos paraméterek jelentős mértékű változását a kis áramokon mért nyitófeszültség hőmérsékletfüggésének ( $S_{VF}$ ) jelentős mértékű megváltozása is jól mutatja – lásd a 10. ábrán. A 11. ábrán a 65 °C-os lapkahőmérsékleten mért izotermikus  $I_F$ - $V_F$  nyitóáram-nyitófeszültség karakterisztikák láthatóak, öregítetlen és 6000 órás öregítés utáni állapotban. A görbék az 5 mA-es pontban „csavarodnak” egymás körül – ugyanez a jelenség tapasztalható valamennyi vizsgált minta, lapkahőmérséklet és eltelt öregítési idő esetében. Ezt okozhatják az öregedés során megnövekvő másodlagos hatások;

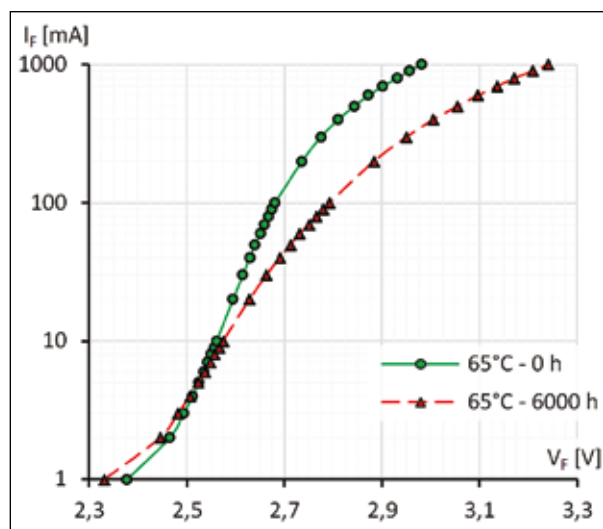
a kisáramú tartományban növekvő parazita áramok, a nagyáramú tartományban pedig a domináns soros ellenállás növekedése, illetve a lapka aktív tartományát képező ún. *dupla heteroátmenet* degradációja is. A dióda karakterisztika ilyen irányú változása – az üzemi nagyáramú tartományban, áramgenerátoros táplálás esetén – egyben az eszköz teljesítményfelvételének időbeni növekedését is jelenti.

A 65 °C-os lapkahőmérsékleten mért izotermikus  $I_F$ - $\Phi_e$  görbék beégetetlen és öregített állapotát a 12. ábra szemlélteti; a kisugárzott teljesítmény a teljes nyitóáram-tartományban csökkent. A 80 °C, illetve 95 °C-os lapkahőmérsékleteken kapott eredmények jellege hasonló. A relatív spektrális teljesítményeloszlás csúcshullámhosszában nem tapasztalunk mérhető változást, ami az alap félvezető struktúra energia-sávszerkezetének stabilitására utal.

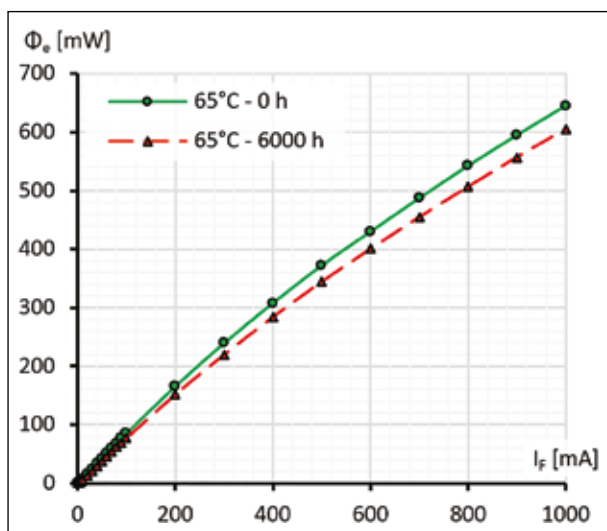
A fő hővezetési út RC hálózati reprezentációja nem változott az öregítés során (lásd a 13. ábrán), azonban a 11. és 12. ábrák alapján elmondható, hogy a minták *energia-konverziós hatásfoka* csökkent, míg a *disszipált teljesítménye* (és ezzel együtt a pn-átmenet üzemi hőmérséklete) növekedett; vagyis a munkapont folyamatosan eltolódott az öregítés során.



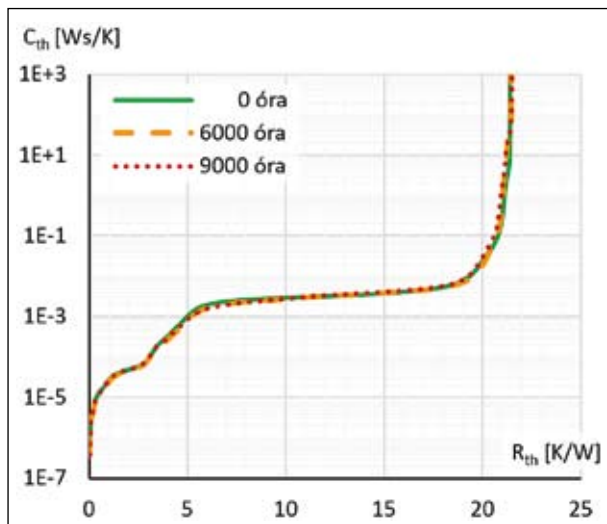
10. ábra Egy Luxeon Z LED 10 mA nyitóáramon mért nyitófeszültségének hőmérsékletfüggése az eltelt öregítési idő (üzemidő) függvényében



11. ábra A Luxeon Z LED izotermikus  $I_F$ - $V_F$  karakterisztikái 65 °C-os lapkahőmérséklet mellett, beégetetlen és öregített állapotban



**12. ábra** A Luxeon Z LED izotermikus  $I_f$ - $\Phi_e$  karakterisztikái 65 °C lapkahőmérséklet mellett, beégetetlen és öregített állapotban



**13. ábra** Egy Luxeon Z LED fő hővezetési útját jellemző hőkapacitás-hőellenállás eloszlás görbe (ún. struktúrafüggvény) öregítetlen állapotban és 6000, ill. 9000 órás öregítés után

Ez ugyanúgy igaz az LM-80 öregítési környezetben, mint a későbbi szerelvényen is, azonban a munkapont megváltozásának pontos mértéke – és ezzel az öregedés tendenciája is – a mindenkor termikus határfeltételtől (a mechanikai szerelvénytől) függ. Az eltelt üzemidőtől is függő üzemi fényáram meghatározására alkalmasá tehető a fent leírt multi-domain LED-modell; a paraméterek időfüggővé tételéhez szükséges összefüggések elméleti és gyakorlati úton történő meghatározása jelenleg is aktív kutatási terület.

## 5. ÜZEMI PARAMÉTEREK MODELLEZÉSE

A javasolt multi-domain LED-modell gyakorlati alkalmazhatóságát néhány szimulációs példán keresztül szemléltetjük. Az alábbi szimulációkat egy Spice jellegű elektro-termikus áramkör-szimulációs programmal végeztük el (a Mentor Graphics Eldo Classic programjával). A példákhoz a korábban taglalt Lumileds Luxeon Z LED-ek mérési eredményeit és egy valós LED-es közvilágítási lámpatest, a Hungaro Lux Light Kft. által a KÖZLED projekt eredményeképpen kifejlesztett PearlLight 48 típusú lámpatest ún. kompakt termikus modelljét használtuk fel. A lámpatest mechanikai CAD modelljének alulnézeti képe, a LED-ek elhelyezkedése és számozási sémája a 14. ábrán látható.

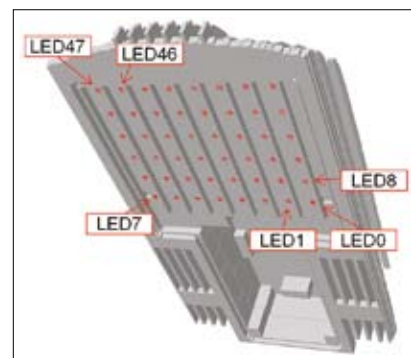
A példánkban szereplő lámpatest esetében 48 hőforrással kell számolni, ezért a termikus kompakt modell egy 48 csomópontot tartalmazó ún.  $N$ -port modell volt, amelyen belül minden csomópont összeköttetésben van a többivel; vagyis minden LED disszipációja hatással van minden másik LED hőmérsékletére is. Ilyen  $N$ -port kompakt modellt eredményesen CFD-szimulációk segítségével kaphatunk (ezzel részletesebben a [19] és [20] cikk foglalkozik). A kapott termikus kompakt modellt a korábban taglalt multi-domain LED-modellhez csatlakoztatva bármely Spice alapú környezetben elvégezhető a szimuláció és megkaphatóak a lámpatestbe beépített összes LED adott környezeti feltételek mellett érvényes munkaponti jellemzői.

A lámpatest termikus kompakt modelljével és a LED-ek multi-domain modelljeivel végzett lámpatest szintű szimuláció futási ideje jellemzően néhány másodperc még nagyszámú LED esetén is, de komplex paramétersöpítés és/vagy nagy felbontású tranziens vizsgálat esetén akár néhány perc hosszúságúra is nyúlhat. Az ilyen jellegű szimulációs modellek hatalmas előnye az, hogy segítségükkel egy lámpatest számos ún. virtuális prototípusa is elkészíthető, amelyekben különböző LED-típusokkal „szerelve” szimulációk segítségével „kipróbálhatjuk” a lámpatestet. (E virtuális tesztelés része még pl. a fényeloszlás szimulációja is, amihez a multi-domain szimulációk révén nyert teljes üzemi fényáram-információt ki kell még egészíteni a gyártók által gyakran publikált ún. sugárkészletekkel is. Az ilyen jellegű szimulációk azonban nem képezik jelen vizsgálatunk tárgyát.)

A 15-19. ábrák a leírt módszerrel nyerhető vizsgálati eredményeket mutatnak be, a teljesség igénye nélkül. Itt fontos megjegyeznünk, hogy a PearlLight 48 lámpatesteket a gyártó nem Luxeon Z, hanem Cree XP-G2 LED-ekkel szereli. A valós összeállítás szimulációs eredményei megtalálhatóak a [26] számú irodalomban, az ellenőrző mérések eredményeivel együtt. A Luxeon Z LED-ek modelljével végzett szimulációs vizsgálatunkkal a fent említett virtuális prototípus vizsgálatra kívántunk egy példát bemutatni.

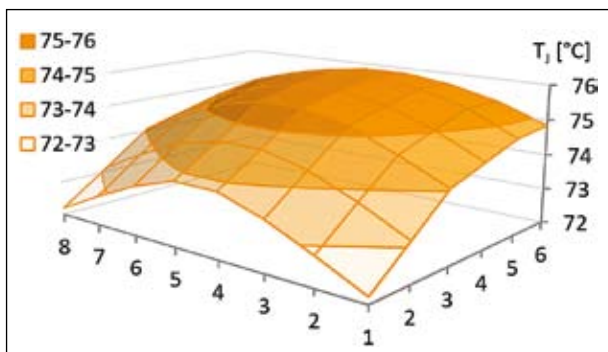
Amennyiben a mindenkori termikus környezet karakterizálása termikus tranziens mérésekkel történik, úgy a kapacitív tagokat is tartalmazó *dinamikus kompakt modell* a mérés kiértékelését követően automatikusan rendelkezésre áll. Ilyen dinamikus termikus modell segítségével pl. tranziens szimuláció is elvégezhető, amely lehetővé teszi pl. a bekapcsolás utáni bemelegedési folyamat pontos nyomon követését.

A 19. ábra egy Zhaga szabványú hűtőbordára szerelt Lumileds Luxeon Z LED bekapcsolási tranziensét mutatja be. (A hűtőszerelvény termikus tranziens mérésével és modellezésével korábbi cikkeink [27], [28] foglalkoznak.) Az ábrán több jelenség is jól megfigyelhető. A tranziens során jól elkülöníthető a jó hővezető képességű és kis tömegű LED-tok, illetve a nagy tömegű, a környező levegő felé relatíve nagy hőellenállást mutató mechanikai hűtőszerelvény hatása. Előbbi időállandója a 10 sec nagyságrendbe esik, míg az utóbbi csak a 10 000 sec tartományban kerül termikusan stabil állapotba. Az alsó és felső görbe „szimmetriája” jól jellemzi

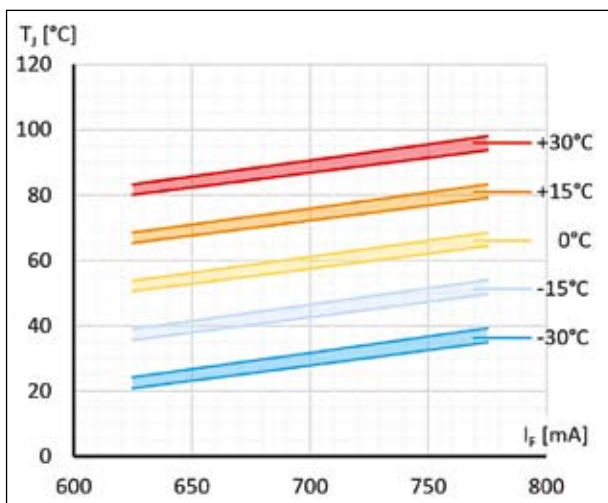


**14. ábra** A PearlLight 48 lámpatest MCAD modelljének képe; pirossal jelölve a LED-ek elhelyezkedését és számozási sémáját [19], [20]

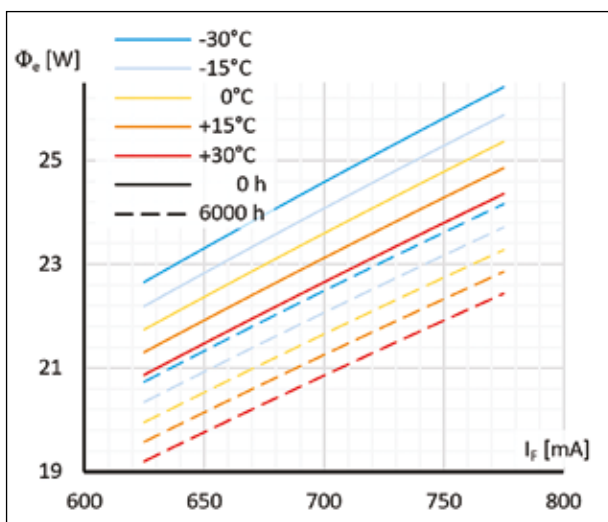




**15. ábra** Luxeon Z LED-ek szimulált üzemi pn-átmenet hőmérséklete a PearlLight 48 lámpatesten, 15 °C környezeti hőmérsékleten, 700 mA nyitóáram mellett (a rácspontok megfelelnek a 14. ábrán látható 6x8-as LED mátrix elemeinek)



**16. ábra** Luxeon Z LED-ek szimulált üzemi pn-átmenet hőmérsékleti tartománya a PearlLight 48 lámpatesten, a nyitóáram és a környezeti hőmérséklet függvényében (vesd össze: 700 mA + 15 °C tartományt a 15. ábrával)



**17. ábra** A virtuálisan Luxeon Z LED-ekkel „szerelt” PearlLight 48 lámpatest szimulációval számított teljes kisugárzott optikai teljesítménye a nyitóáram és a környezeti hőmérséklet függvényében; a folytonos és szaggatott vonalak a LED-ek öregítetlen és 6000 órás öregítés utáni állapotára vonatkoznak

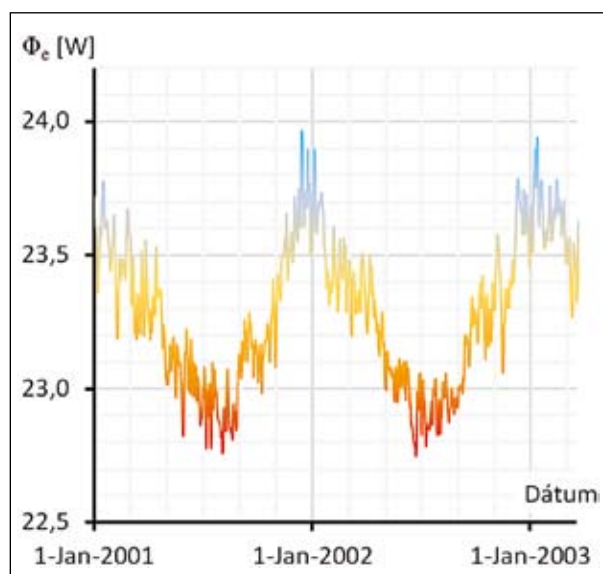
a kisugárzott teljesítmény hőmérsékletfüggő természetét. Az ábra továbbá jól szemlélteti azt is, hogy a széles körű karakterizálási és modellezési eljárás eredményeképpen lehetőség

van az optikai paraméterek szimulációjára a kapcsolás utáni olyan rövid időtartományban is, ahol mérések a jelenleg rendelkezésre álló eszközökkel általában nem végezhetőek el.

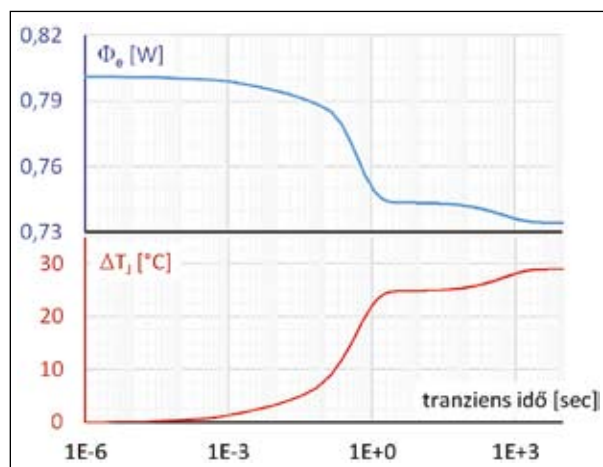
## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A teljesítmény LED-ek elektromos, termikus és optikai paraméterei csak együttesen kezelhetőek, ezek egymásra hatása kombinált mérési eljárásokat, illetve multi-domain szimulációs modelleket tesz szükségessé. A jelen cikkben leírt multi-domain LED-modell alkalmas Spice-alapú áramkör-szimulációs programokban történő implementálásra, a segítségével elvégzett rendszerszintű (lámpatest szintű) szimuláció néhány perc, de akár néhány másodperc alatt rendelkezésre áll. Ilyen szimulációk során megkapható a LED-ek elektromos munkapontja, üzemi hőmérséklete és üzemi fényárama, akár már a tervezés korai szakaszában is, a lámpatest tényleges fizikai elkészítése nélkül.

Az ilyen szimulációk során az elektromos és termikus környezet rugalmasan változtatható, cserélhető; a modell birtokában tetszőleges LED-típus bármely mechanikai



**18. ábra** Virtuálisan Luxeon Z LED-ekkel „szerelt” PearlLight 48 lámpatest teljes kisugárzott optikai teljesítménye 700 mA nyitóáramon; szimuláció a Szombathelyen rögzített napi középhőmérsékletek alapján



**19. ábra** Zhaga-szabványú hűtőbordára szerelt Luxeon Z LED bekapcsolási folyamata: a pn-átmenet hőmérséklet és a kisugárzott optikai teljesítmény tranziensei a bemelegedés során [18]

szerelvénnyel vizsgálható. Egy ilyen szimuláció során cél lehet az eszköz elhasználódásának, öregedésének vizsgálata, becslése is. Egy nagy teljesítményű LED-minta standard eljárással végzett öregítése során mért adatok alapján bemutattuk a vizsgált LED-ek néhány öregedési jellemzőit és felvázoltuk azt, hogy ezek segítségével hogyan vizsgálható egy lámpatest várható viselkedése.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnénk megköszönni a Hungaro Lux Light Kft.-nek, hogy a jelen cikkben ismertetett munkához rendelkezésünkre bocsátotta a PearlLight48G lámpatestük részletes mechanikai terveit, a lámpatestbe szerelt LED-ek különálló példányait és egy teljes működő lámpatestet is a karakterizálás-modellezés-szimuláció-ellenőrző mérés ciklus teljes megvalósításához.

Az itt ismertetett LED karakterizációs, modellezési és szimulációs munkákat részben az Európai Unió H2020-as kutatási és innovációs programja keretén belül finanszírozott Delphi4LED H2020 ECSEL 692465 sz. projekt támogatta, amelyet kiegészített a Nemzeti Fejlesztési, Kutatási és Innovációs Alap NEMZ\_15-1-2016-0033 sz. támogatási szerződés keretén belül nyújtott társfinanszírozása.

Külön köszönjük Robin Bornoffnak és James Dysonnak, a Mentor Graphics munkatársainak a PearlLight48G lámpatest modellezése kapcsán nyújtott segítségét.

### Irodalomjegyzék

- [1] Mentor Graphics, FloEFD LED module, [http://s3.mentor.com/public\\_documents/datasheet/products/mechanical/products/floefd-led-module.pdf](http://s3.mentor.com/public_documents/datasheet/products/mechanical/products/floefd-led-module.pdf)
- [2] Kovács Zoltán, Marosy Gábor, Poppe András, „LED-es közvilágítási lámpatestek termikus tranziensteszteléssel való diagnosztikai vizsgálatának lehetőségei”, **ELEKTROTECHNIKA** 104:(9) pp. 30-36. (2011)
- [3] Temesvölgyi Tamás, Farkas Gábor, Poppe András, „AC LED-ek termikus impedanciájának mérése”, **ELEKTROTECHNIKA** 104:(7-8) pp. 10-14. (2011)
- [4] Poppe András, „Teljesítmény LED-ek új termikus mérési szabványai”, In: Barkóczi G., Bolvári G., Szabó F. (szerk.): Világítástechnikai Évkönyv 2012-2013, Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2013, pp. 96-102.
- [5] Poppe András, Szalai Albin, Hegedűs János, „LED-ek multi-domain szimulációs modelljei és azok gyakorlati vonatkozásai”, In: Németh Zoltán, Nagy Balázs Vince (szerk.) Világítástechnikai Évkönyv 2014-2015, Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2015, pp. 112-121.
- [6] A. Poppe, G. Farkas, V. Székely, Gy. Horváth, M. Rencz, „Multi-domain simulation and measurement of power LED-s and power LED assemblies”, In: Proceedings of the 22nd IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'06). Dallas, USA, March 14-16 2006, pp. 191-198.
- [7] V. Székely, T. V. Bien, "Fine structure of heat flow path in semiconductor devices: A measurement and identification method", **Solid-State Electronics** 31(9):1363-1368, 1988
- [8] A. Poppe, G. Molnár, T. Temesvölgyi, "Temperature dependent thermal resistance in power LED assemblies and a way to cope with it", In: Proceedings of the 26th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'10). 21-25 March 2010, Santa Clara, USA pp. 283-288
- [9] JEDEC Standard JESD51-50, "Overview of Methodologies for the Thermal Measurement of Single- and Multi-Chip, Single- and Multi-PN Junction Light-Emitting Diodes (LEDs)", <https://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-50.pdf> (2017. jan.)
- [10] JEDEC Standard JESD51-51, "Implementation of the Electrical Test Method for the Measurement of Real Thermal Resistance and Impedance of Light-Emitting Diodes with Exposed Cooling", <https://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-51.pdf> (2017. jan.)
- [11] JEDEC Standard JESD51-52, "Guidelines for Combining CIE 127-2007 Total Flux Measurements with Thermal Measurements of LEDs with Exposed Cooling Surface", <https://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-52.pdf> (2017. jan.)
- [12] JEDEC Standard JESD51-53, "Terms, Definitions and Units Glossary for LED Thermal Testing", <https://www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD51-53.pdf> (2017. jan.)
- [13] CIE 127:2007 Technical Report "Measurement of LEDs" (ISBN 978 3 901 906 58 9)
- [14] A. Poppe, "A step forward in multi-domain modeling of power LEDs", In: Proceedings of the 28th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'12), 18-22 March 2012, San Jose, USA, pp. 325-330.
- [15] A. Poppe, T. Temesvölgyi, "A General Multi-domain LED Model and its Validation by Means of AC Thermal Impedance", In: Proceedings of the 29th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'13), 17-21 March 2013, San Jose, USA, pp. 137-142.
- [16] A. Poppe, "Multi-domain compact modeling of LEDs: an overview of models and experimental data", **Microelectronics Journal** 46(12A): 1138-1151. (2015)
- [17] A. Poppe, A. Szalai: "Practical aspects of implementation of a multi-domain LED model", In: Proceedings of the 30th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'14), San Jose, USA, March 9-13 2014, pp. 153-158.
- [18] A. Poppe, J. Hegedűs, A. Szalai, "Multi-domain modeling of power LEDs based on measured isothermal I-V-L characteristics", In: Proceedings of the CIE Lighting Quality & Energy Efficiency Conference, 3-5 March 2016, Melbourne, Australia, CIE x042:2016, pp. 318-327.
- [19] A. Poppe, J. Hegedűs, 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: Proceedings of the 32nd IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'16), 14-17 March 2016, San Jose, USA, pp. 44-49.
- [20] 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** (beküldött kézirat, bírálat alatt), 2017
- [21] CIE S 017/E:2011 ILV: International Lighting Vocabulary, 17-730-as címszó <http://eilv.cie.co.at/term/730>
- [22] A. Alexeev, R. Bornoff, S. Lungten3, G. Martin, G. Onushkin, A. Poppe, M. Rencz, J. Yu, "Requirements Specification for Multi-Domain LED Compact Model Development in Delphi4LED", In: Proceedings of the EuroSime 2017 Conference, 2-5 April 2017, Dresden, Germany (közlésre elfogadva)
- [23] Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources, IESNA Standard IES LM-80, 2008. (ISBN 978 0 87995 227 3)
- [24] E. Richman, "The elusive "life" of LEDs: How TM-21 contributes to the solution" (eds ERIC RICHMAN) (LEDs Magazine, 2011) Online elérhető: <http://www.ledsmagazine.com/articles/2012/11/the-elusive-life-of-leds-how-tm-21-contributes-to-the-solution-magazine.html> (2017. febr.)
- [25] IES TM-21-11: "Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources" + Addendum A, Illumination Eng. Soc., New York, NY, USA, 2011. (ISBN 978 0 87995 259 4)
- [26] J. Hegedűs, G. Hantos, A. Poppe, "Light output stabilisation of LED based streetlighting luminaires by adaptive current control", **Microelectronics Reliability** (beküldött kézirat, bírálat alatt), 2017
- [27] Poppe András, Kollár Ernő, Tóth Zoltán, Simonovics János, „Foglalatba illeszthető LED modulok hűtő szerelvényeinek termikus vizsgálata”, In: Németh Zoltán, Nagy Balázs Vince (szerk.), Világítástechnikai Évkönyv 2014-2015, Budapest: MEE Világítástechnikai Társaság, 2015, pp. 98-103.
- [28] A. Poppe, G. Hantos, J. Hegedűs, "Application of the Transient Dual Interface Method in Test Based Modeling of Heat-sinks Aimed at Socketable LED Modules", In: Proceedings of the 31st IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'15), 15-19 March 2015, San Jose, USA, pp. 261-266.



### Hegedűs János

doktorandusz, a MEE VTT tagja  
BME Elektronikus Eszközök Tanszéke  
[hegedus@eet.bme.hu](mailto:hegedus@eet.bme.hu)



### Dr. Poppe András

egyetemi docens, tanszékvezető  
BME Elektronikus Eszközök Tanszéke  
a MEE VTT alelnöke  
[poppe@eet.bme.hu](mailto:poppe@eet.bme.hu)

Lektor: Csuti Péter Pannon Egyetem