

❖ — LED-ek multi-domain szimulációs modelljei és azok gyakorlati vonatkozásai

– Poppe András, Szalai Albin, Hegedűs János –

A LED-ek ún. multi-domain modelljei konzisztens módon írják le az eszköz elektromos karakterisztikáját, termikus viselkedését és fénykibocsátásának főbb jellemzőit. Az ilyen modellek célja az, hogy egy teljesítmény LED működését lehessen vele szimulálni az ún. rendszerszintű tervezés során, ahol jellemzően vagy az elektromos környezet, vagy a mechanikai környezet vagy ezek együttesének kialakítása történik. Tekintve, hogy a végső cél egy adott világítástechnikai feladat megoldása, a rendszer (lámpatest) szintű szimulációra szánt multi-domain modellek egyik fontos feladata az, hogy segítségükkel megállapítható legyen az adott (termikus és elektromos) körülmények között alkalmazott LED üzemi fényárama. Jelen cikkünkben áramkör-szimulációs környezetben (pl. a széles körben ismert Spice-hoz hasonló programokban), illetve lámpatestszintű termikus szimulációra alkalmas programokban (pl. az ún. CFD programokban) használható LED-modelleket és az ilyen modellek használatához szükséges paraméterek meghatározásának a módját vázoljuk fel.

1. Bevezetés

A teljesítmény LED-ek működését egymással szoros csatolásban lévő fizikai folyamatok határozzák meg. Ezért olyan ún. multi-domain modellekre van szükség a LED-es alkalmazások tervezésekor, amelyekkel konzisztens módon, szimultán szimulálhatjuk a LED-ek elektromos, termikus és optikai tulajdonságait. Gyakorlati szempontból tehát olyan modellekre van szükség, amelyekkel a tervezéskor figyelembe vehető az, hogy a pn-átmenet hőmérsékletétől függ a LED-ek energiakonverziós hatásfoka, ill. fényhasznosítása, végső soron tehát az üzemi fényárama. A modellalkotásnál azt is figyelembe kell venni, hogy milyen jellegű tervezési feladat megoldása során használatos szimulációs programba szánjuk azt. Elektromos tervezéskor áramkör-szimulációs programba (pl. Spice) illeszthető modellre van szükség, míg

például egy LED-es lámpatest mechanikai tervezése során a környezet felé történő hőátadás szimulációjára is szükség van, amelyet jellemzően ún. CFD (computational fluid dynamics) alapú termikus szimulációs programmal (pl. FloEFD [1]) végezhetünk el.

Fontos tehát egy LED-lapka (pontosabban a pn-átmenet) hőmérsékletének ismerete, amelyet a tokozott LED ún. R_{thJA} junction-to-ambient (a pn átmenettől, azaz a lapka aktív felületétől a termikus környezetig terjedő) hőellenállása és a LED disszipációja alapján számolhatunk ki a LED állandósult állapotára vonatkozólag. A disszipáció kiszámításához ismerni kell a LED nyitófeszültségét, nyitóáramát és kisugárzott optikai teljesítményét:

$$P_H = I_F \cdot V_F - P_{opt} \quad (1)$$

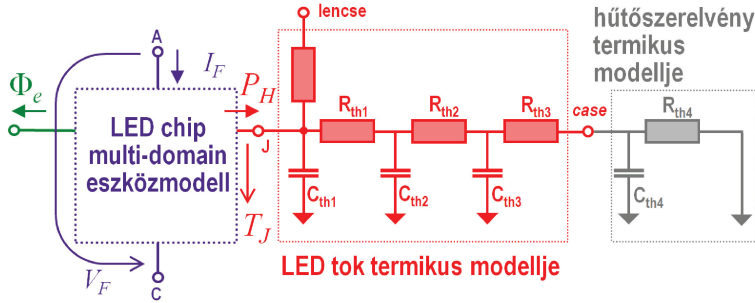
ahol $P_{opt} = \Phi_e$ a LED teljes radiometriai fluxusa. A következőkben azt tekintjük át, hogy milyen modell egyenletekkel célszerű a LED-ek komplex működését leírni áramkör-szimulációs programok, illetve CFD-alapú termikus szimulációs programok számára, ezen modelleken paramétereit hogyan határozhatjuk meg, illetve milyen módon számolhatjuk ki a világítástechnikai tervezés számára legfontosabb jellemzőt, az üzemi fényáramot.

2. LED-ek multi-domain áramkör-szimulációs modellje

2.1. A modell egyes részei

A LED-ek multi-domain modelljeinek [2], [3], [4] alapja egy olyan áramkör-szimulátorba illeszthető modell, amely lehetővé teszi a LED-csip hőmérsékletfüggő nemlineáris elektromos karakterisztikájának, a LED-tok termikus viselkedésének és a LED fénykibocsátásának az egyidejű szimulációját. Egy ilyen modell struktúráját az 1. ábra szemlélteti.

LED-ek multi-domain szimulációs modelljei és azok gyakorlati vonatkozásai



1. ábra. Egy tokozott LED multi-domain szimulációs modelljének vázlatja. I_F a teljes nyitóáramot, V_F a LED külső kapcsai közt mérhető nyitófeszültséget, T_J a lapkahőmérsékletét, Φ_e az emittált optikai teljesítményt, P_H pedig a LED disszipációját jelöli

E szerint célszerű a LED-tok termikus viselkedését a LED-lapka (csip) modelljétől elválasztható termikus RC hálózat formájában megadni. Egy ilyen modell termikus tranziens méréséből meghatározható; ennek részleteivel a 3. szakaszban foglalkozunk.

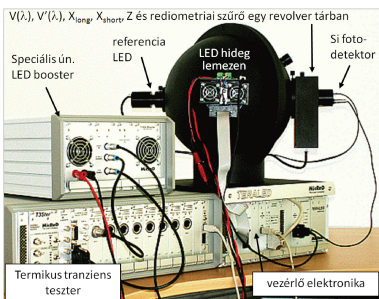
A LED aktív részének (pn-átmenet) a modellezése más-más megközelítést igényel egy áramkör-szimulációs program, illetve egy CFD termikus szimulációs program esetében. Azonban mindkét esetben fontos, hogy a modellparaméterek a LED-ekre vonatkozó mérés technikai szabványoknak [5] megfelelő mérési összeállításokkal végzett mérések alapján könnyen megállapíthatóak legyenek. A 2. ábrán egy olyan mérési összeállítás képe látható, amelynek a segítségével a modellalkotáshoz szükséges mérések teljesen automatizálhatóan elvégezhetőek.

2.2. LED-csip elektromos modellje áramkör-szimuláció céljára

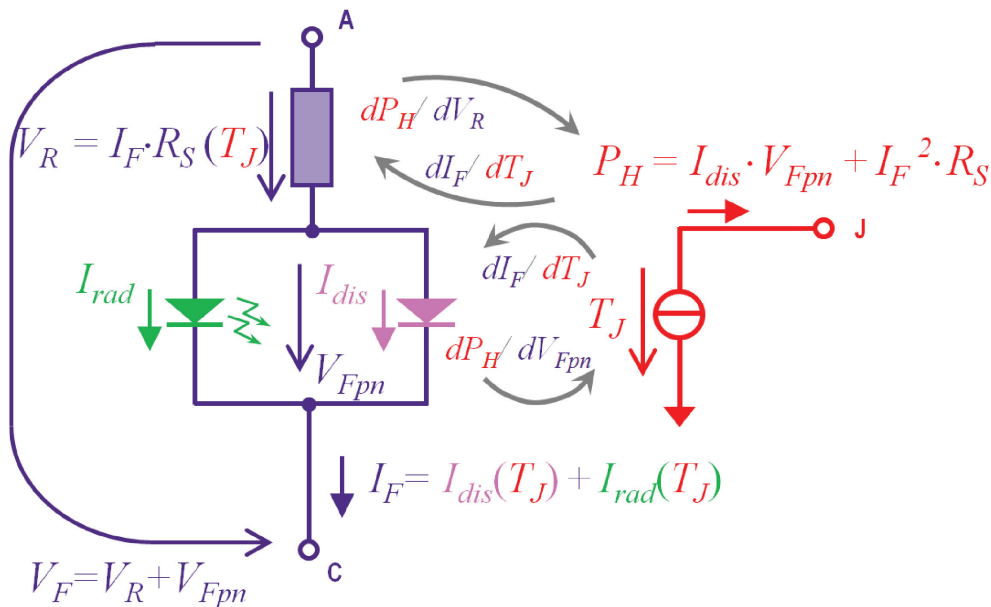
A legtöbb áramkör-szimulációs program az ún. csomóponti potenciálok módszerét alkalmazva működik, ezért az ilyen programok számára a feszültség függvényében kifejezett eszközkarakterisztikákat célszerű megadni. Félvezető diódák esetében ez a jól ismert exponenciális karakterisztika, az ún. Shockley-modell:

$$I_F(V_F) = I_0 [\exp(V_F / (mV_T)) - 1] \quad (2)$$

ahol I_0 az ún. szaturációs áram, $V_T = kT/q$ az ún. termikus feszültség és m az ún. idealitási faktor, k a Boltzman-állandó, T a pn-átmenet abszolút hőmérséklete, q az elemi töltés. Egy pn-átmenet katódjában (n adalékolású félvezető) az elektromos áramot a többségi töltéshordozó elektronok vezetik, míg a p adalékolású oldalon a lyukak. A pn-átmenet környékén az áramvezetés „stafétabotját” rekombináció révén adják át egymásnak a lyukak és az elektronok. A rekombináció kétféle módon mehet végbe: ún. direkt sávátmenettel, amelynek révén a rekombináció során a félvezető anyag tiltott sáv szélességének megfelelő hullámhosszúságú fény kibocsátás történik, illetve ún. indirekt sávátmenettel, amikor a rekombináló elektronok a félvezető kristályrácsának adják át a rekombináció során felszabaduló energiájukat, azt melegítik. Az előbbit radiatív, az utóbbit disszipatív rekombinációs folyamatnak nevezzük. Egy LED



2. ábra. Tokozott LED-ek, illetve áramköri hordozóra (pl. MCPCB-re) szerelt kisebb LED-modulok teljes körű (kombinált elektromos, optikai és termikus) mérésére szolgáló gyakorlati mérési összeállítás



3. ábra. Egy elektrotermikus áramkör-szimulációs programba építhető LED-modell topológiája és legfontosabb ágjellemzői

esetében mindkét folyamat egyszerre jelentkezik, így egy LED nyitóáramát modellezhetjük úgy, hogy azt két komponensre bontjuk.

Az egyik összetevő a disszipatív, a másik pedig a fénykibocsátással járó (a kristályrácsot tehát nem melegítő) radiatív rekombinációs folyamatokhoz rendelhető. A 3. ábra jelöléseit felhasználva ezt fejezi ki a (3) egyenlet:

$$I_F(V_{Fpn}) = I_{dis}(V_{Fpn}) + I_{rad}(V_{Fpn}) \quad (3)$$

Ennek értelmében egy LED ún. belső pn-átmenetét úgy tekinthetjük, mintha azt két párhuzamosan kapcsolt dióda alkotná: az egyik csak disszipál, melegíti a LED-lapkát, a másik pedig csak fényt bocsát ki, mintha az egy 100%-os hatásfokú LED lenne. Ezt, a belső pn átmenetet tartalmazó modellt, kiegészítve a dióda elektromos soros ellenállásával szemlélteti a 3. ábra. A LED nyitóáramának e két összetevőjét is a Shockley-féle modellel írhatjuk le úgy, hogy mind a disszipatív, mind a radiatív komponenshez

egy-egy áramkonstanst és idealitási faktort rendelünk:

$$I_F(V_{Fpn}) = I_{0_dis} \cdot [\exp(V_{Fpn}/(m_{dis}V_T)) - 1] + I_{0_rad} \cdot [\exp(V_{Fpn}/(m_{rad}V_T)) - 1] \quad (4)$$

A 3. ábrán látható modell a LED belső pn-átmenete mellett tartalmazza az R_S soros ellenállást és tartalmaz egy termikus ágat is, ami egyetlen, a LED P_H disszipációját leíró „áramgenerátorból” áll. Ezen ág a „termikus föld” és a LED pn-átmenetét termikus szempontból jellemző ún. junction csomópont közt található. E termikus csomópont „potenciálja” a pn-átmenet hőmérséklete, a T_J lapkahőmérséklet (lásd az 1. és 3. ábrát). A LED (1) egyenlet szerinti disszipációja megfelel a 3. ábrán szereplő összefüggésnek: a belső pn-átmenet disszipatív rekombinációs folyamatai miatti hőtermelés és a LED soros ellenállásán fellépő disszipáció összegének. A (4) egyenlet jobb oldalán szereplő áramösszetevőket a 2. ábra szerinti műszer

LED-ek multi-domain szimulációs modelljei és azok gyakorlati vonatkozásai

összeállítással meg is mérhetjük. A 3. ábra jelöléseit használva, a radiatív rekombinációs folyamatokhoz rendelhető áramösszetevőt a mért teljes radiometriai fluxus (emittált optikai teljesítmény), és a belső pn-átmenet nyitófeszültsége hányadosaként kapjuk:

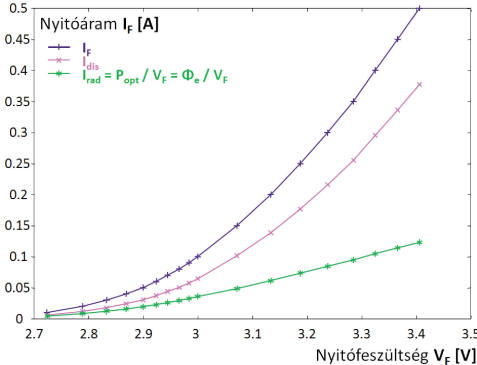
$$I_{rad}(V_{Fpn}) = \Phi_e / V_{Fpn} \quad (5)$$

A disszipatív áramösszetevő ennek és a teljes nyitóáramnak a különbsége:

$$I_{dis}(V_{Fpn}) = I_F(V_F) - \Phi_e / V_{Fpn} \quad (6)$$

Színes LED-ek esetében a fenti modell nagyjából a LED pn-átmenetében lezajló fizikai folyamatoknak felel meg. Fehér LED-ek esetében azonban a mért fénytelsítmény a fénypor 100%-nál kisebb konverziós hatásfoka miatt kisebb lesz, mint a fényport gerjesztő, kék fényt előállító félvezető lapkát elhagyó teljes fénytelsítmény.

LED nyitóáram összetevők $T_J = 55^\circ\text{C}$ hőmérsékleten mérve

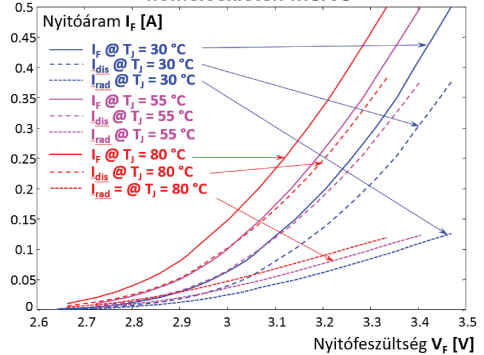


4. ábra. Egy fehér LED 55°C -os lapkahőmérséklet mellett mért izotermikus feszültség-áram karakterisztikái.

Emiatt a (4)-(6) egyenletekkel adott LED pn-átmenet modell csak egy ún. black box (fekete doboz) modellnek tekinthető. Ez a modell formailag ugyanolyan, mint a színes LED-ekre alkalmazható fizikai modell és segítségével ugyanolyan pontos szimulációk végezhetőek, mint a színes LED-ek ese-

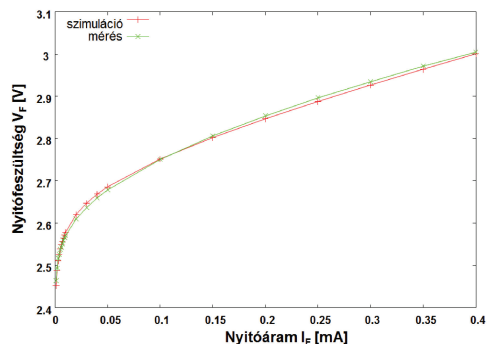
tében. A 4. ábrán egy fehér LED konstans 55°C -os lapkahőmérséklet mellett mért feszültség – áram karakterisztikái láthatóak. A kék görbe a teljes nyitóáram, a rózsaszín görbe a disszipatív rekombinációs folyamatokhoz tartozó, a zöld görbe pedig a fényemissziót okozó áramösszetevő. (Az egyes áramkomponensek jelölésére alkalmazott színezési konvenció megegyezik a 3. ábrán alkalmazottal.) A modell részét képezi a 3. ábra sűrke nyilakkal jelzett elektrotermikus és termoelektromos „transzfer vezetések” kiszámítása is. Ezek értékeit az ábrán feltüntetett parciális deriváltak adják.

LED nyitóáram összetevők $T_J = 30^\circ\text{C}, 55^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}$ hőmérsékleten mérve



5. ábra. Egy fehér LED három különböző lapkahőmérséklet mellett mért izotermikus feszültség-áram karakterisztikái

Szimulált és mért LED nyitó karakterisztikák ($T_J = 35^\circ\text{C}$)

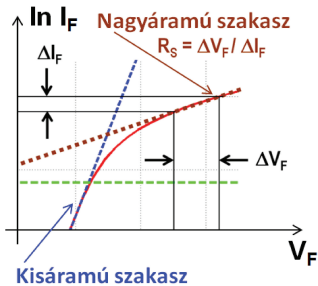


6. ábra. Egy fehér LED 35°C -os lapkahőmérsékletre vonatkozó mért és szimulált elektromos karakterisztikája

A karakterisztikák hőmérsékletfüggését meghatározhatjuk, ha a kérdéses LED-et több különböző lapkahőmérséklet mellett is megmérjük. Az 5. ábrán egy ilyen karakterisztikasereg látható. A 6. ábrán a (4)-(6) egyenletek segítségével számított nyitófeszültség – nyitóáram karakterisztikát vetünk össze az eszköz mért karakterisztikájával. A mért és szimulált karakterisztikát jó illeszkedését a modellegyenletek mellett a jó modellparaméter-készlet biztosítja. A paraméter identifikációval a 2.3. szakaszban foglalkozunk bővebben.

2.3. Az áramköri modell paraméter-identifikációja

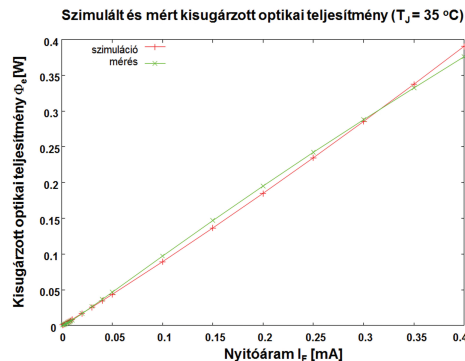
A (4)-(6) egyenletekkel adott LED-modell paramétereit a szokásos módon határozhatjuk meg. A folyamatot a teljes $I_F - V_F$ karakterisztika nagyáramú szakaszán kezdjük az R_S soros ellenállás meghatározásával, amelyet a 7. ábra szemléltet. Ezen karakterisztikaszakaszon a dióda soros ellenállása dominál, az áram megváltozásával egyenesen arányos feszültségváltozást eredményezve: $R_S = \Delta V_F / \Delta I_F$ – jó kezdeti értéket szolgáltatva a soros ellenállás globális görbeillesztéssel való pontosabb meghatározásához.



7. ábra. Egy dióda soros ellenállásának meghatározása

Ezt követően minden mért munkapont-ra kiszámolhatjuk a belső pn-átmeneten eső $V_{Fpn} = V_F - I_F \cdot R_S$ feszültséget. Ennek ismeretében az (5) és (6) egyenlet szerinti módon

kiszámolhatjuk az I_{rad} és I_{dis} áramösszetevőket. Az így megkapott feszültség – áram karakterisztikákhoz illesztve (4) egyenletben szereplő exponenciális összefüggéseket meghatározhatjuk az $I_{rad,0}$ és $I_{dis,0}$ áramegyütthatókat és az m_{rad} és m_{dis} idealitási faktorokat.



8. ábra. Egy fehér LED 35°C-os lapkahőmérsékletre vonatkozó mért és szimulált nyitóáram – optikai teljesítmény karakterisztikái

A fenti folyamatot az összes lapkahőmérsékletre mért izotermikus karakterisztikákra elvégezve, a soros ellenállás, az áramegyütthatók és az idealitási faktorok hőmérsékletfüggését is meghatározhatjuk. Ezt az összes mért ($I_F - T_J$) munkapontra vonatkozó globális optimalizációval végezzük. Az optimalizáció során a célfüggvény természetesen a mért és szimulált karakterisztikák valamilyen norma szerinti legkisebb eltérése. Ilyen norma lehet a feszültség-áram karakterisztikák illeszkedésének (6. ábra) négyzetes hibája, vagy az energiakonverziós hatásfok, illetve az áram-optikai teljesítmény karakterisztikák (8. ábra) négyzetes hibája, vagy célfüggvény lehet akár a LED mért és számított harmonikustorzítása közti különbség minimalizálása [4], illetve ezen normák alkalmas súlyozású keveréke.

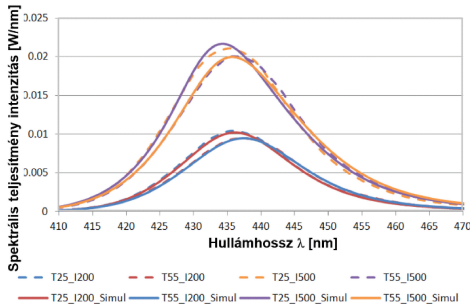
2.4. A fénykibocsátás modellezése

Amennyiben célunk pusztán a LED által kibocsátott teljes optikai teljesítmény

LED-ek multi-domain szimulációs modelljei és azok gyakorlati vonatkozásai

megállapítása, azt a (4)-(6) egyenletek szerinti modell gyakorlatilag azonnal szolgáltatja, hiszen az (4) egyenlet alapján az áramkör-szimulációs program által számított I_{rad} és V_{Fpn} mennyiségek alapján számolható: $\Phi_e = I_{rad} \cdot V_{Fpn}$.

Egy kék LED mért és szimulált spektrális teljesítményeloszlásai



9. ábra. Egy kék LED 25°C-os és 55°C-os lapkahőmérséklet és 200 mA-es, valamint 500 mA-es nyitóáram esetén mért és szimulált spektrális teljesítményeloszlása

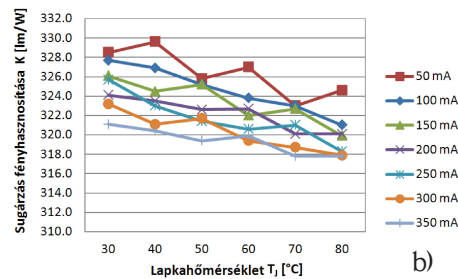
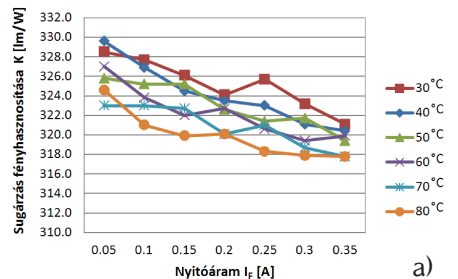
2.4.1. Színes LED-ek esete

A teljes emittált optikai teljesítmény mellett színes LED-ek esetében fontos lehet a spektrális teljesítményeloszlás tetszőleges nyitóáram és lapkahőmérséklet kombináció esetére történő számítása. Erre Keppens és munkatársai nyomán [6] egy olyan modellt dolgoztunk ki [3], [7], amely néhány referenciahőmérséklet és nyitóáram érték mellett mért spektrális teljesítményeloszlás görbéhez történő illesztéssel megállapított paraméterek alapján az aktuális I_{rad} áramösszetevő és a T_j lapkahőmérséklet esetére meghatározza a LED spektrális teljesítményeloszlását. Ilyen mért és számított görbéket mutatunk be a 9. ábrán. Az így számított spektrumok alapján egy színes LED tetszőleges fénytechnikai paramétere az ismert integrálok segítségével számolható.

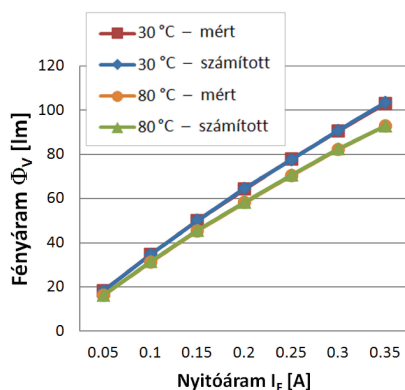
2.4.2. Fehér LED-ek esete

Fehér LED-ek esetében a spektrális teljesítményeloszlás modellezése nem reális

célkitűzés. Ugyanakkor a teljes fényáram tetszőleges munkaponti áramra és lapkahőmérsékletre vonatkozó számítása fontos feladat. Ehhez célszerű a CIE Nemzetközi Világástechnikai Szótárában (ILV) definiált, szokásosan K -val jelölt sugárzás fényhasznosítása (luminous efficacy of radiation) mennyiséget [9] felhasználni, amellyel a LED fényárama az emittált optikai teljesítményből számolható: $\Phi_v = K \cdot \Phi_e$.



10. ábra. Egy fehér LED K értékének mért áram- és hőmérsékletfüggése



11. ábra. Egy fehér LED mért és a (7) egyenlet szerint számított fényáramának áram- és hőmérsékletfüggése

LED-ek multi-domain szimulációs modelljei és azok gyakorlati vonatkozásai

A 2. ábra szerinti mérőrendszerrel K áram- és hőmérsékletfüggése meghatározható. A 10. ábra ilyen mérési eredményeket mutat be. Ezek alapján a sugárzás fényhasznosításának áram- és hőmérsékletfüggésére lineáris közelítés adható. Ezzel, illetve a LED áramköri modellje által számított mennyiségekkel egy fehér LED fényáramának számítására az alábbi modell adható:

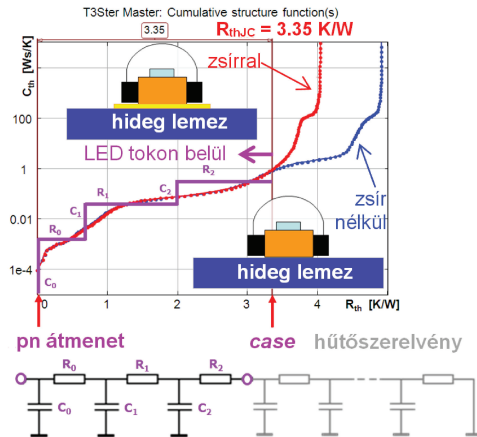
$$\Phi_V = (K_0 + \alpha_T \cdot (T_J - T_{J0}) + \alpha_I \cdot (I_F - I_{F0})) \cdot I_{rad} \cdot V_{Fpn} \quad (7)$$

ahol K_0 a sugárzás fényhasznosításának, a T_{J0} referencia (lapka) hőmérsékleten mért értéke, α_T és α_I a K lineáris hőmérséklet- és áramfüggését leíró együtthatók.

A 11. ábra szemlélteti a fényáram (7) egyenlet szerinti modelljének pontosságát. Az így számított fényáramot az áramkör-szimulációs programok számára szánt LED-modellben egy olyan vezérelt áramgenerátorral lehet leírni, amelynek árama a (7) egyenlet segítségével számolt értékkel egyenlő.

3. A LED-tok termikus modellje

A LED-tokok termikus modelljét is előállíthatjuk a 2. ábrán bemutatott kombinált termikus és radiometriai/fotometriai LED-mérőállomással (a JEDEC JESD51-51, 51-52 és 51-14-es szabványok [5] együttes alkalmazásával) mért adatok alapján. Ezek szerint a hideg lemezre szerelt LED-tok valós (azaz a kisugárzott teljes optikai teljesítményt is figyelembe vevő módon megkapott), $Z_{th}(t)$ termikus impedancia görbéjét kell megmérnünk úgy, hogy a LED-tok és a hideg lemez közt kétféle termikus határfelületi ellenállást valósítunk meg.



12. ábra. Egy teljesítmény LED-tok termikus modelljének a JEDEC JESD51-14-es szabvány szerinti végzett termikus tranziens mérések alapján történő megállapítása

Az első esetben „szárazon”, azaz ún. termikus zsír alkalmazása nélkül, majd a második esetben a tok hűtőfelülete és a hideg lemez közti átmeneti ellenállást csökkentő termikus zsír (ún. TIM – thermal interface material – termikus határfelületi anyag) alkalmazásával mérünk. Ezután a mért impedanciagörbéket ún. struktúrafüggvényekké alakítjuk. A struktúrafüggvények a LED pn-átmenetétől a környezetig (itt: a hideg lemezre) terjedő hővezetési utat alkotó régiók rész-hőellenállásainak és hőkapacitásainak a „térképe”. Azért nevezzük struktúrafüggvénynek, mert alakja a hővezetési út anyagi összetétele és geometriai szerkezete szerint változik. A két mérés közötti különbség a tok és a hideg lemez között alkalmazott strukturálisváltozás (termikus zsír hiánya/jelenléte), így a két méréshez tartozó struktúrafüggvények elválasztási pontja pont annak a fizikai helynek, nevezetesen a LED-tok aljának, azaz a tok „case” felületének felel meg, ahol a változást létrehoztuk (12. ábra). Az ehhez a ponthoz tartozó hőellenállás értéke a JEDEC JESD 51-14-es szabvány [10] szerint a tok ún. R_{thJC} junction-to-case hőellenállása.

Ez a hőellenállás érték állandósult állapotbeli (DC) szimulációhoz elégséges, de ha

LED-ek multi-domain szimulációs modelljei és azok gyakorlati vonatkozásai

pontos tranziens szimulációkat is szeretnénk végezni, akkor a hőkapacitások figyelembevétele is szükséges. Ha tehát a struktúrafüggvényeknek a LED-tokot jellemző, az origó és az $R_{th/C}$ pont közötti szakaszát egy lépcsős függvénnyel közelítjük, akkor a lépcsőfokok hossza a hővezetési utat dinamikus szempontból modellező RC-létrahálózat ellenállásértékeit, a lépcsők magassága pedig ezen hálózat hőkapacitás értékeit adja meg, ahogy azt a 12. ábra is szemlélteti.

Az így előállított termikus RC-hálózat az, amit a LED áramköri modelljének J jelű termikus kapcsához kell csatlakoztatnunk, ahogy azt az 1. illetve a 3. ábrán láthatjuk. (A termikus modellt természetesen a „case” csomópontnál a hűtőszervény termikus modelljével le kell zárnunk.)

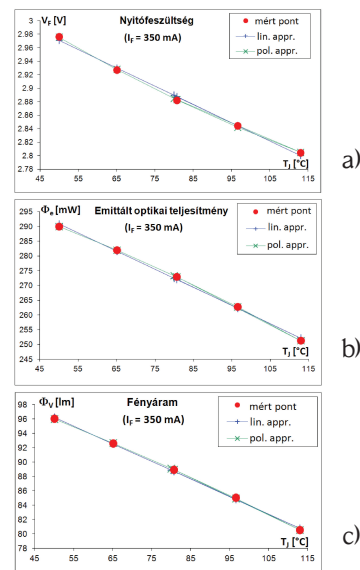
A LED-tokok fenti módon elkészített termikus hálózati modellje (vagy kompakt modellje) nem csak elektrotermikus áramkör-szimulációs programokban való felhasználásra alkalmas, hanem pl. egy lámpatest mechanikai CAD-tervei alapján készített, részletes termikus modellbe is beépíthető, az arra alkalmas termikus szimulációs programokban. Az ilyen kompakt modellek alkalmazását számos ún. CFD-program is támogatja. Ezek révén az igen számításgényes áramlástani számításokat is végző termikus szimulációs programok sebessége valamelyest gyorsítható azáltal, hogy a LED-tokok esetében nem végeznek részletes számításokat. A kompakt termikus modellek másik előnye az, hogy nem tartalmaznak a tokok részletes szerkezetére vonatkozó semmiféle gyártási titkot, így akár a LED-gyártók maguk is a lámpatesttervezők rendelkezésére bocsáthatnak ilyen modelleket. Nyilvánvalóan az sem okozhat nagy gondot, ha ilyen modelleket a gyártók nem publikálnak, hiszen az itt ismertetett módon mérési eredmények alapján bárki elkészítheti a számára fontos LED-tokok ilyen kompakt termikus modelljeit.

4. LED-ek egyszerűsített modellje

A gyakorlati életben a teljesítmény LED-eket áramgenerátoros elektromos táplálással működtetik. Ez tehát azt jelenti, hogy az I_F nyitóáramuk konstans. A félvezetődiódák elméletéből ismert, hogy ilyen esetben a pn-átmenet nyitófeszültsége növekvő hőmérséklettel csökken (13 a. ábra). A nyitófeszültség ilyen megváltozása, tág hőmérsékleti határokon belül egy lineáris közelítéssel pontosan leírható:

$$V_F(I_{F0}, T_J) = V_{F0} + S_{VF0} \cdot (T_J - T_{J0}) \quad (8)$$

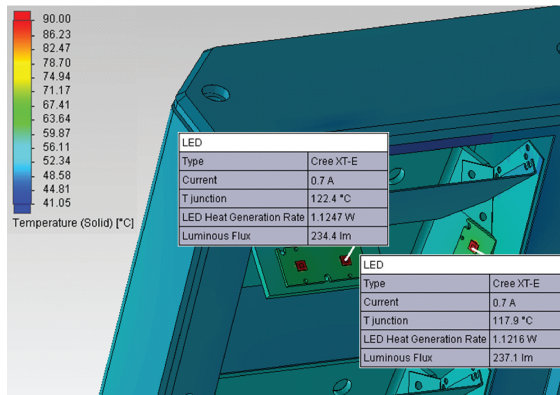
ahol I_{F0} a LED pn-átmenetére kényszerített ismert nyitóáram, V_{F0} a nyitófeszültségnek az ezen áram mellett egy (tetszőlegesen megválasztott) T_{J0} referencia-hőmérsékleten mért értéke, S_{VF0} a nyitófeszültség-változás hőmérsékleti együtthatója. Egyetlen pn-átmenet esetében S_{VF0} -1,5 .. -2 mV/°C körüli, konkrét értéke függ a pn-átmenetet alkotó félvezető anyag tiltott sáv szélességétől és az átmenetre kényszerített nyitóáramtól is.



13. ábra. Egy 1 W-os fehér LED konstans nyitóáram mellett mért nyitófeszültségének, optikai teljesítményének és fényáramának hőmérsékletfüggése



LED-ek multi-domain szimulációs modelljei és azok gyakorlati vonatkozásai



14. ábra. Egy tükrös optikai rendszerrel szerelt LED-es közvilágítási lámpatest virtuális prototípusának termikus szimulációs eredményei a FloEFD programban. A hőmérsékleteloszlás mellett a LED-ek lapkahőmérsékleteit és az ezen hőmérsékletekhez tartozó üzemi fényáram értékeit is kiszámolja a program

Áramgenerátoros táplálás esetén, ahogy az a 13 b. és 13 c. ábrán is látszik, a kisugárzott teljes optikai teljesítmény, illetve a teljes fényáram is növekvő lapkahőmérséklet esetén csökken. Nagyon sok LED esetében, különösen akkor, amikor a nagyáramú karakterisztikán a soros ellenállás hatása dominál, ez a hőmérséklet-függés a nyitófeszültséghez hasonlóan egy lineáris összefüggéssel jól közelíthető:

$$\Phi_e(I_{F0}, T_J) = \Phi_{e0} + S_{\Phi e0} \cdot (T_J - T_{J0}) \quad (9)$$

$$\Phi_V(I_{F0}, T_J) = \Phi_{V0} + S_{\Phi V0} \cdot (T_J - T_{J0}) \quad (10)$$

ahol T_{J0} praktikusán ugyanaz a referencia-hőmérséklet, mint ami a (8) egyenletben is szerepel, Φ_{e0} és Φ_{V0} pedig a kisugárzott optikai teljesítménynek, illetve a fényáramnak ezen referencia-hőmérsékleten mért értéke, $S_{\Phi e0}$ és $S_{\Phi V0}$ e fluxusváltozások hőmérsékleti együtthatói.

Tehát, ha egy adott I_{F0} nyitóáramra és T_{J0} referenciahőmérsékletre ismertek a V_{F0} , Φ_{e0} és Φ_{V0} valamint az $S_{V F0}$, $S_{\Phi e0}$ és $S_{\Phi V0}$ modell-paraméterek értékei, akkor a fenti lineáris összefüggések segítségével a CFD megoldó algoritmuson belül az aktuális T_J hőmérséklet meghatározása érdekében végzett néhány iteráció után [amelynek során az (1)-es, a (8)-es és a (9)-es egyenletet használjuk], a (10)-es egyenlet segítségével egy lámpatestbe beépített összes

LED lapkahőmérséklete, disszipációja és üzemi fényárama meghatározható.

Ezen konstans nyitóáramra vonatkozó egyszerűsített multi-domain LED-modell hatalmas előnye, hogy paraméterei a szokásos LED-mérések eredményeiből egyszerű lineáris regresszió segítségével, magának a mérőrendszernek az adatkiértékelő programjában meghatározhatóak. Ez a funkció a 2. ábrán látható mérőrendszerhez tartozó legfrissebb adatkiértékelő programban is elérhető.

5. Alkalmazási példa

A 3. szakaszban ismertetett termikus kompakt modellezés egyszerűsített multi-domain LED-modellt a Mentor Graphics cég a FloEFD nevű, MCAD rendszerbe ágyazott CFD szimulációs rendszerében [1] implementálta. A LED-tokok termikus modelljeit a hozzájuk tartozó multi-domain LED-modell paraméterekkel együtt egy LED-modellkönyvtárból választhatja ki a lámpatesttervező gépészmérnök. A termikus peremfeltételek megadása után a LED-tokok kompakt modelljeivel kiegészített lámpatestmodell CFD-szimulációja során a program kiszámítja a lámpatesten a részletes hőmérséklet-eloszlást is és a lámpatestbe beépített LED-ek lapkahőmérsékleteit is, valamint



a (10)-es egyenlet segítségével minden egyes LED-re meghatározza az adott hőmérséklet-hez tartozó üzemi fényáram értékét is. Ilyen szimulációs eredményt mutat be a 14. ábra.

6. Összefoglalás

A teljesítmény LED-ek ún. multi-domain, kombinált elektromos-termikus és optikai modelljei fontos segédeszközt jelentenek a LED-es alkalmazástervezők számára. Az áramkör-szimulációs programokban implementálható modellek segítségével az elektromos munkapont meghatározása közben a LED-ek saját melegedése, és az ennek következtében fellépő fényáramváltozása vehető figyelembe. A konstans, kényszerített munkaponti áram esetére vonatkozó egyszerűsített LED-modellek MCAD-rendszerbe ágyazott CFD-szimulációs környezetben használva, lehetővé teszik a lámpatestek termikus szempontból helyes tervezését. A szimuláció révén a mechanikai kialakításnak a lámpatestbe épített LED-ek üzemi fényáramára gyakorolt hatása azonnal megállapítható.

Az itt ismertetett LED-modellek gyakorlati előnye, hogy paramétereik a szilárdtest-fényforrásokban széles körben elterjedt kombinált termikus és radiometriai/fotometriai mérőrendszerrel megkapható mérési eredményekből közvetlenül meghatározhatóak.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1]. Mentor Graphics, FloEFD LED module, http://s3.mentor.com/public_documents/datasheet/products/mechanical/products/floefd-led-module.pdf
- [2]. 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.
- [3]. 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,
- [4]. 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,
- [5]. Poppe András: „Teljesítmény LED-ek új termikus mérési szabványai”, In: Barkóczi G., Bolvári G., Szabó F. (szerk.): „Világítástechnikai Évkönyv 2012-2013”, pp. 96-102
- [6]. A. Keppens, W. Ryckaert, G. Deconinck, P. Hanselaer, „Modeling high power light-emitting diode spectra and their variation with junction temperature”, J. Appl. Phys., Vol. 108, No. 4, pp.043104-043104-7 (2010)
- [7]. K. Paisnik, A. Poppe, T Rang, G. Rang, „Physics related modeling of Power LEDs”, In: Proceedings of the 13th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC'12), Tallinn, Estonia, 3-5 October, 2012, pp. 57-60
- [8]. 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
- [9]. CIE S 017/E:2011 ILV: International Lighting Vocabulary, 17-730-as címszám <http://eilv.cie.co.at/term/730>
- [10]. JEDEC Standard JESD51-14 „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”, (November 2010)