

❖ – **Delphi4LED - A mérésektől a LED-ek szabványos multi-domain kompakt modeljeiig: szimulációs modellek fejlesztése a szilárdtest világítástechnikai ipar beszállítói láncának különböző szereplői számára**

– Dr. Poppe András –

Tartalmi összefoglaló

A szilárdtest világítástechnika (SSL) beszállítói lánc mentén, a különböző integráltsági fokú rendszerek tervezését (a LED-toktól egy teljes világítási feladat megoldásáig) számos probléma nehezíti. Ezek közül az egyik legjelentősebb az, hogy a tokozott LED-ekre vonatkozó adatlapi információk sokszor nem elégségesek, illetve a különböző gyártók adatlapjainak információtartalma nem egységes. Olyan adatok, mint pl. a fénytechnikai jellemzők hőmérsékletfüggése vagy nincs megadva, vagy ha igen, akkor is csak többnyire grafikonok formájában. Gyakran az adatlapokon közölt fénytechnikai jellemzők 25°C-os lapkahőmérsékletre vonatkoznak, jóllehet, valós üzemi körülmények közt egy LED-chip hőmérséklet ennél tipikusan magasabb. Egyes gyártók már megadnak 85°C-os vonatkozó üzemi fényáramot, de nyilvánvaló, hogy pontos számításokra ez sem alkalmas, nem beszélve arról, hogy az ilyen fényárammérés körülményei többnyire nem ismertek, így az sem tudható, hogy a környezet vagy a LED pn-átmenete volt-e az adott hőmérsékleten. Az adatlapi információk és az azok alapját képező mérések és a valós üzemi körülmények közötti szakadék áthidalásának egy lehetséges eszközt jelent a LED-ek és a LED-ek környezetének alkalmas modelljeivel végzett ún. multi-domain szimuláció. Az alkalmazott modellek pontosak kell, hogy legyenek, de egyetlen LED-gyártótól sem várható az üzleti/gyártási titok tárgyát képező, a LED pontos fizikai struktúráját definiáló részletes adatok megosztása. E probléma megoldására született meg az elektronikai iparban több mint 2 évtizede a félvezető eszközök ún. kompakt modellezésének a gondolata és gyakorlata. Azt felismerve, hogy ez az ún. multi-domain

szemlélettel kiterjeszhető a LED-ekre, ill. a szilárdtest világítástechnikára, megalakult a Delphi4LED konzorcium, amelynek vezető európai világítástechnikai cégek, egyetemek és kutatóintézetek, független mérőlaborok és számos kis világítástechnikai, ill. lámpatest-tervező cég, valamint szimulációs szoftvereket és LED-es méréstechnikát fejlesztő cég a tagja. Célkitűzésük az, hogy a LED-ek esetében is olyan standard méréseken és modellezési eljárásokon alapuló módszertant dolgozzon ki, amely lehetővé teszi a LED-es rendszerek multi-domain modellezését és szimulációját az SSL ipar különböző integrációs szintjein.

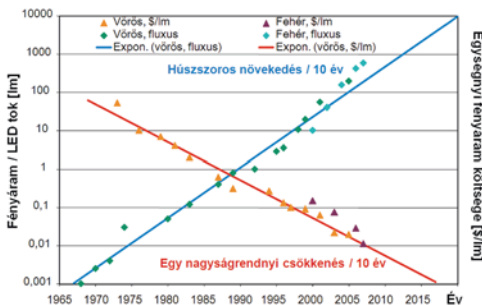
1. Bevezetés: a világítástechnika forradalma

Napjainkban, a LED-ek széles körű elterjedése következtében a világítástechnikai ipar világszerte nagy átalakuláson megy, ill. ment keresztül.

Ha visszatekintünk az elektronikai ipar XX. századi történetére, azt láthatjuk, hogy a félvezető-technológia rohamosan kiszorította a korábbi, vákuumtechnikán alapuló aktív eszközöket, lehetővé téve a korábbinál sokkal nagyobb termelékenységu gyártással előállítható, megbízhatóbb működésű és kisebb energiafogyasztású eszközök, az integrált áramkörök megjelenését és széles körű elterjedését. Ennek révén megszületett a mikroelektronika, amelyen belül a mikroprocesszorok megjelenése további forradalmat eredményezett, elvezetve a mai digitális világhoz (számítógépek, okos telefonok, internet, a dolgok internete). A mikroelektronika piac diktálta fejlődési trendjét ismer- te fel Gordon Moore és megfogalmazta az

e trendet leíró, máig érvényesnek bizonyult összefüggést, az ún. Moore-törvényt^{[1][2]}. E szerint egy digitális integrált áramkörtől lapkán megvalósított tranzisztorok száma kb. 18..24 havonta megduplázódik, miközben méretük és előállítási költségük folyamatosan csökken.

A 2014-ben Nobel-díjjal honorált GaN technológián alapuló kék LED-ek, és az ezek felhasználásával készülő ún. fényporos fehér LED-ek piaci megjelenése megteremtette a szilárdtest világítástechnikát, ahol a mikroelektronikához hasonló fejlődési trendek alakultak ki, de értelemszerűen a funkcionalitás fejlődését az egy LED-lapkából kinyerhető fényárammal lehet jellemezni, míg a költségek csökkenése az egységi fényáram előállítási költsége tekintetében hasonlít a Moore-törvény által előre jelzettekhez. Ezen összefüggéseket Roland Haitz és munkatársai ismerték fel^[3], és Haitz-törvénye néven váltak közismertté^[4] (1. ábra).



1. ábra. Haitz-törvényel^{[3],[4]} a LED-ek fejlődéséről (1^{3]} alapján)

A LED gyártástechnológia gyors fejlődése egyre rövidebb termék életciklust eredményez: egy adott pillanatban korszerű LED-tok igen hamar túlhaladottá válik, akár el is tűnik a piacról, megnehezítve ezzel a magasabb integráltsági fokú termékek (lámpatestek) tervezését és szinte ellehetetlenítve egy LED-es világítóttest pótalkatrész-ellátását.

A LED-ek széles körű megjelenése e fenti, nyilvánvaló tervezői és üzemeltetői problémák mellett a teljes világítástechnikai ipar

drasztikus átalakulását is eredményezte. Ennek egyik jól érzékelhető jele a hagyományos fényforrások egyre erőteljesebb visszazorulása, ami pl. egyes klasszikus, világszerte ismert fényforrásgyártók térszűrését, visszazorulását eredményezte. Az ilyen klasszikus gyártók közül azok éltek/élnek túl, amelyek olyan cégcsoporthoz tartoztak/tartoznak, ahol a félvezetőtechnológiai ipari kultúra már régóta jelen volt, így a LED-technológia meghonosodása a cég szerves fejlődésének része volt. Az ilyen klasszikus fényforrás-gyártó cégek mellett sok új szereplő is megjelent a LED-piacon. Ezek tipikusan a különleges félvezető eszközök piacán már tapasztalatot szerzett félvezetőgyártók. Mára élesen szétválnak a LED-chip / LED-tok gyártók és a (retrofit) LED-lámpagyártók.

A klasszikus félvezetőiparhoz hasonlóan a LED-chip / LED-tok gyártás szintén Dél-kelet-Ázsiára koncentrálódik. A fent vázolt trendek egy további következménye a piaci verseny fokozódása, ami pl. erős ázsiai árnyomás formájában jelenik meg. Ezzel egyidejűleg jellemző, hogy a magasabb hozzáadott érték a magasabb integráltsági fokú, bonyolultabb világítástechnikai termékekben (komplett LED-es világítóttestek, "okos" lámpatestek) jelenik meg.

2. Európai válasz a kihívásokra

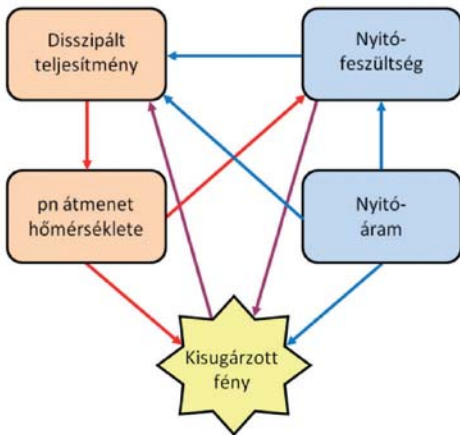
Az európai világítástechnikai ipar nem tudja felvenni a versenyt az ázsiai olcsó tömegtermelés árnyomásával szemben. Ebben a helyzetben egy lehetséges kiutat a magas minőségű, nagyobb hozzáadott értékű termékek fejlesztése jelentheti. Fontos tehát a LED-es termékek jó, gyors, költséghatékony és megbízható tervezése.

Közismert, hogy egy LED-es alkalmazás tervezése, tekintettel a LED-ek komplex működésére, szintén egy összetett feladat, amelynek megoldása során a jó termikus tervezés legalább annyira fontos, mint az elektromos és optikai tervezés. A LED-ek

Delphi4LED - A mérésektől a LED-ek szabványos multi-domain kompakt modeljeig: szimulációsmodellek fejlesztése a szilárdtest világítástechnikai ipar beszállítói láncának különböző szereplői számára

esetében, ahogy azt a 2. ábra szemlélteti, a három fő működési tartomány jellemzői kölcsönösen hatnak egymásra.

E tekintetben a mikroelektronikával vont párhuzam nem pontosan állja meg a helyét: egy digitális integrált áramkör működésére ugyan van némi hatási az IC-lapka hőmérsékletének, de az alapvető elektromos funkciók tág hőmérsékleti tartományban (legalábbis a végfelhasználó szempontjából) hőmérséklet-függetlennek tekinthetők; tervezés során pusztán arra kell figyelemmel lenni, hogy az IC-lapka hőmérséklete a fatális meghibásodás szempontjából kiritikus értéket ne haladja meg. Emiatt egy ilyen IC funkcionális tervezése és környezetének termikus tervezése első közlésben függetlenül történhet. Analóg integrált áramkörök vagy integrált áramköri blokkok esetében ez azonban már nem mondható el: nagyon gyakran szükség van az elektromos viselkedés és a termikus viselkedés együttes vizsgálatára, tervezésére.



2. ábra. A LED-ek multi-domain működése: az elektromos, optikai és termikus üzemi jellemzők kölcsönösen hatnak egymásra

Ennek egyik fontos eszköze az ún. elektro-termikus szimuláció. Az ilyen jellegű szimulációs programok több évtizedes múltra tekintenek vissza – e területen a BME Elekt-

ronikus Eszközök Tanszéke nemzetközi szinten is úttörő szerepet játszott^{[5],[6],[7],[8]}.

2.1 Termikus kompakt modellek: előkép az elektronikában

Mind a digitális, mind az analóg IC-k esetében a termikus viselkedés pontos szimulációjához elengedhetetlen az áramkör termikus környezetének, elsősorban az integrált áramköri toknak a pontos modellezése. Egy IC-gyárban – a saját áramkörök vonatkozásában – ez nem jelenthet áthidalhatatlan problémát, de pl. egy nyomtatott huzalozású lemezen kialakított összetett áramköri modul esetében problémát jelent a modulba beültetett IC-kre vonatkozó részletes tokozás információ megszerzése.

A kilencvenes évek közepe táján, e problémát felismerve, az akkori vezető európai félvezetőgyártók, valamint egy, az elektronikai rendszerek termikus szimulációjára szolgáló szoftverek fejlesztésére specializálódott cég, az Európai Közösség támogatásával, az ún. DELPHI projekt keretén belül kidolgozta az IC-tokok ún. *kompakt termikus modelljeinek* megalkotására vonatkozó módszertant^{[9],[10],[11]}. Ennek lényege az, hogy az IC-tok részletes geometriával és anyagparaméterekkel jellemzett modelljét (ami értelemszerűen gyártási titkot képező információt hordoz) egy hőellenállásokból álló, egyszerűsített hálózati modellel helyettesítjük. Egy ilyen modell akkor tekinthető a gyakorlatban elfogadhatónak, ha a szimuláció termikus határfeltételeitől függetlenül, mind a tokon belüli IC-lapkahőmérséklet, mind a főbb határfelületek hőmérséklete szempontjából, mind pedig az egyes hőellenállások által reprezentált hővezetési úton terjedő hőáramok tekintetében kellő pontosságot biztosít. Az elvárt pontosság kb. 5-10% eltérés a részletes geometriával adott modellel végzett szimulációk eredményétől.

Ez az ún. DELPHI kompakt modellezési módszertan annyira sikeres lett, hogy egy követő projekt (az ún. SEED projekt) segítségével a korábbi DELPHI konzorciumi tagok elkezdték az akkor leggyakoribb IC-tokokra vonatkozó modellkönyvtárak elkészítését. A siker másik jele, hogy a szilárdtest elektronikai gyártók nemzetközi szakmai szervezete, a JEDEC szabványosította az IC-tokok DELPHI topológiájú termikus kompakt modellejt, ill. a modellezési módszertant^{[12],[13]}.

Természetesen nem csak a statikus termikus viszonyok, hanem a hőmérséklet és a disszipáció időbeli változásai, különösen a gyors, nagy amplitudójú változások a rendszerek élettartama, megbízhatósága szempontjából fontosak. Ezek szimulációval történő követése ún. tranzienst modelleket igényel, azaz a hőellenállásokból álló statikus termikus kompakt modelleket alkalmas módon ki kell egészíteni megfelelő hőkapacitásokkal is.

Az EU 5. kutatási keretprogramja támogatásával megvalósított ún. PROFIT-projekt (2000-2003) az ilyen modellek és modellezési módszertan kidolgozását tűzte ki célul. A korábbi DELPHI konzorciumi tagokhoz többek között csatlakozott a BME Elektronikus Eszközök Tanszéke és a Tanszék spin-off cége, az egykori MicReD Kft. (ma a Mentor Graphics egyik magyarországi részlege) az általuk korábban a THERMINIC-projektben (1994-1997) kidolgozott termikus tranzienst mérés technikával és dinamikus kompakt modellezési módszertannal. A termikus tranzienst mérések tették lehetővé azt, hogy a kompakt modellek elkészítéséhez használt részletes fizikai modelleket mérésekkel ellenőrizni, "finomhangolni" lehessen. A PROFIT-projekt a dinamikus termikus kompakt modellek, a termikus tranzienst mérés technika ipari szintre emelése mellett az integrált áramkörök elektro-termikus szimulációjával kapcsolatban is szolgált új eredményekkel^{[14],[15]}. (Az IC-tokok termikus kompakt modellezésével kapcsolatos további,

részletes áttekintést a^[16] publikációban talál az érdeklődő olvasó.)

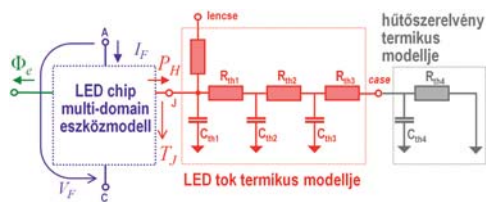
2.2 A korábbi mérés technika, szimulációs és modellezési módszertan kiterjesztése LED-ekre

A teljesítmény LED-ek 2000-es évek elején történő megjelenése felkeltette az igényt az ilyen LED-tokok termikus mérése és modellezése iránt is. Igen hamar kiderült, hogy a klasszikus, szilícium-alapú félvezető eszközökre széleskörűen alkalmazott, a JEDEC JESD51-I jelű szabvány^[17] nem alkalmazható változtatás nélkül: a LED-lapkát fűtő veszteségi hő számításakor figyelembe kell venni a fény formájában kibocsátott teljesítményt. E gondolat mentén született meg a ma T3Ster TeraLED[®] néven ismert, a LED-ek kombinált termikus és radiometriai/fotometriai mérésére szolgáló, a BME és a Pannon Egyetem közreműködésével kifejlesztett műszeregyüttes^[18], amely a világ vezető LED-gyártói körében széles körben elterjedt. Az általunk javasolt és megvalósított kombinált termikus és radiometriai mérés a LED-tokok karakterizálása terén új nemzetközi mérés technikai szabványok alapja lett, amelyekről a Világítástechnikai Évkönyv 2012/2013-as számában részletesen beszámoltunk^[19].

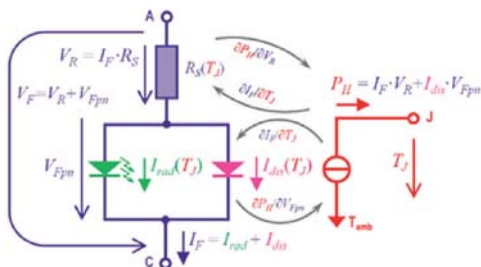
Természetesen nem csak a termikus mérési eljárások szorultak megújításra, hanem a Nemzetközi Világítástechnikai Társaság, a CIE által 2007-ben publikált, a LED-ek optikai méréseivel foglalkozó 127-2007 jelű dokumentuma^[20] is. A különböző LED-gyártók különböző laboratóriumaiban végzett optikai mérések összehasonlíthatóságát az biztosítja, ha a méréseket ismert, jól definiált LED-lapkahőmérséklet mellett végzik. Az ezt figyelembe vevő, új LED mérési ajánlások kidolgozásával foglalkozott a CIE TC2-63-as műszaki bizottsága. A bizottság végső ajánlásait tartalmazó műszaki jelentésének megjelenése 2017-ben várható.

Delphi4LED - A mérésektől a LED-ek szabványos multi-domain kompakt modeljeiig: szimulációsmodellek fejlesztése a szilárdtest világítástechnikai ipar beszállítói láncának különböző szereplői számára

A LED-ek kombinált termikus és radiometria/fotometria mérésének gondolata mellett elég korán felvetődött a LED működés multi-domain szimulációjának a gondolata is^[21]. Ennek lényege, hogy az analóg IC-k elektro-termikus szimulációjához hasonló módon végezzük a LED-ek szimulációját is, de a korábbi elektro-termikus dióda modellt egészítsük ki legalább a kisugárzott optikai teljesítmény számításával is. E gondolatkörhöz kapcsolódott a teljesítmény LED-ek tokozásának dinamikus kompakt modellezése is: az ezzel kapcsolatos első publikáció 2006-ból származik^[22]. A BME Elektronikus Eszközök Tanszékén – a már említett korábbi, félvezetős alapokról kiindulva – elsőként tettünk javaslatot a LED-ek olyan multi-domain áramkör-szimulációs modelljére, amely a LED-tokok kompakt termikus modelljével együtt alkalmas tokozott LED-eknek kereskedelmi szimulációs programokkal való vizsgálatára. A javasolt modellstruktúrát a 3. ábra szemlélteti. Az itt hivatkozott LED-chip modell részleteit a 4. ábra mutatja be. A multi-domain LED-modellezéssel kapcsolatos eredményeinket a Világítástechnikai Évkönyv 2014/2015-ös kötetében ismertettük magyar nyelven^[23]. A témával foglalkozó, részletes áttekintő cikk 2015-ben jelent meg^[24].



3. ábra. Egy tokozott LED multi-domain szimulációs modelljének vázlatja. IF a teljes nyitóáramot, VF a LED hülső kapcsai között mérhető nyitófeszültséget, TJ a laphőmérsékletét, Φ_e az emittált optikai teljesítményt, PH pedig a LED disszipációját jelöli.



4. ábra. LED chip szintű multi-domain szimulációs modelljének vázlatja. A 3. ábrán Φ_e -vel jelölt optikai teljesítményt az e modell által számított $I_{rad} \cdot V_{Fpn}$ szorzat adja meg.

2.3 A Delphi4LED projekt céljai: szabványos interfészek a mérésektől a szimulációig

Az elektronikai / mikroelektronikai iparban már sikert aratott és a szabványosítás révén általánosan elfogadottá vált DELPHI módszertan és az ún. DELPHI típusú kompakt modellek jó példát jelentenek a szilárdtest világítástechnika számára is.

Innen, illetve a klasszikus termikus mérés-technika és a chipekre, valamint tokozásaikra vonatkozó szimulációs modellek LED-ekre történő kiterjesztésére tett első lépések alapján merült fel a gondolat, hogy egy új kutatási projekt ketén belül, szisztematikus módon, az egész SSL beszállítói lánc főbb szereplőinek az igényeit szem előtt tartva próbáljunk meg a LED-ekre vonatkozó új mérési, modellezési és szimulációs eljárásokat kidolgozni.

A korábbi DELPHI, SEED, THERMINIC és PROFIT projektek LED-ek területén érdekelt meghatározó partnerei (Philips Research/Lighting, Mentor Graphics UKlex Flomerics], BME, Mentor Graphics Magyarországlex MicReDI) további, LED-specifikus ipari és akadémiai partnerekkel kiegészülve létrehozták a Delphi4LED konzorciumot és sikeres pályázatukkal elnyerték az EU H2020-as kutatás-fejlesztési és innovációs

Delphi4LED - A mérésektől a LED-ek szabványos multi-domain kompakt modelljeiig: szimulációsmodellek fejlesztése a szilárdtest világítástechnikai ipar beszállítói láncának különböző szereplői számára

keretprogramja ún. ECSEL részprogramjának, továbbá a résztvevő országok nemzeti kutatás-fejlesztést támogató hatóságainak támogatását. 2016 júniusában így indult el a Delphi4LED projekt^[25].



5. ábra. A Delphi4LED projekt elképzelése a LED-ek jövőben várható mérési/modelllezési módszereiről

Ahogy arra a korábbiakban már utaltunk, 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 (mint amelyet a 3. és 4. ábrán mutattunk be), 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 végezhetünk el, amelyek számára a 3. ábrán pirossal jelzett termikus kompakt modelljével jellemezhetjük a LED-tokokat.

Kiemelt fontosságú, hogy a modellek paramétereit alkalmas mérésekből, pl. konstans lapkahőmérséklet mellett mért ún. izotermikus áram-feszültség-optikai teljesítmény karakterisztikákból, vagy pl. a LED-tokok mért, $Z^{th}(t)$ termikus impedanciái alapján állapíthassuk meg.

A fentieknek célul kitűzött megvalósítását szemlélteti az 5. ábra.

A LED-tokokra, illetve áramköri hordozóra (pl. ún. MCPCB "csillag nyákra") szerelt LED-ek vonatkozásában nagyjából kialakultak a nemzetközi méréstechnikai szabványok (lásd a JEDEC LED-ekre vonatkozó termikus mérési szabványait^[9]) és ajánlások, mint pl. a CIE TC2-63 műszaki bizottság 2017-re várt jelentése (Optical Measurement of High- Power LEDs címmel). Ez azt is jelenti, hogy az 5. ábra legalsó "emelete" várhatólag legfeljebb a gyakorlat által igényelt pontosításokra fog csak szorulni.

Új ajánlások, illetve szabványok kidolgozása szükséges azonban arra, hogy a mérési eredmények egységes, lehetőség szerint számítógépi programokkal könnyen kezelhető, elektronikus formában álljanak rendelkezésre abból a célból, hogy azok gépi feldolgozásával a LED-chip-ek, LED-tokok, ill. hordozóra szerelt LED-modulok kompakt modelljei, ill. azok paramétereit automatikusan előállíthatóak legyenek. Ilyen ajánlások kidolgozása a feladata pl. a 2016 tavaszán életrehívott CIE TC2-84-es munkabizottságnak^[26], amely bizottsághoz több Delphi4LED partner képviselője is csatlakozott.

Az 5. ábra legfelső szintjének megvalósítása a szimulációs programokat fejlesztő, gyártó és forgalmazó cégek (pl. a Mentor Graphics) feladata. Olyan, szimulációs programtól és gyártó

**Delphi4LED - A mérésektől a LED-ek szabványos multi-domain kompakt modelleig:
szimulációsmodellek fejlesztése a szilárdtest világítástechnikai ipar beszállítói láncának
különböző szereplői számára**

cégtől független modell-leíró fájlformátumokat kell kidolgozni, amelyeket az egyes szimulációs programok kezelni tudnak, az így leírt szimulációs modelleket alkalmazni képesek. Az ilyen fájlformátumok kidolgozását célzó tevékenység, csatlakozva az elektronikai ipar igényeihez is, pl. a JEDEC JCI5-ös munkabizottságában már folyamatban van.

A Delphi4LED projekt által kitűzött főbb feladatok a következők:

- termikus kompakt modellek kiterjesztése több hőforrással rendelkező LED-tokokra (pl. egy tokos RGB vagy RGBW LED-ek, CoB LED-ek, a fényorréteg önálló hőforrásként való figyelembevétele), több termikus csomópont és több hővezetési út figyelembevétele (pl. fénypor-hőmérséklet, tesztpont- vagy forraszpont-hőmérséklet számítása,
- multi-domain LED-chip modellek pontosítása (kisáramú karakterisztika pontos számítása, korai optikai teljesítmény tranziensek pontos számítása stb),
- a fenti modellekhez adatot szolgáltató mérések pontosítása, a szükséges minimális LED-mintaszám megállapítása,
- a LED-paraméterek (pl. nyitófeszültség) valós szórásának figyelembevétele, lehetőség szerinti modellezése,
- lámpatestek kompakt termikus modellezése^{[28],[29]},
- mérések automatizálása,
- modellparaméter identifikáció automatizálása,
- standard adat interfészek kidolgozása (adattartalom, fájlformátum), nemzetközi szabványosítás elősegítése,
- a LED-ek multi-domain viselkedésével és a projekttel, ill. a projekt eredményeivel kapcsolatos ismeretterjesztés.

A Delphi4LED projekt célkitűzéseivel kapcsolatos egyéb részletek tekintetében a konzorcium már megjelent, vagy megjelenés alatt álló publikációira utalunk^{[31],[32]}.

3. Összefoglalás

A Delphi4LED projekt végső célkitűzése az, hogy a különböző integráltsági fokú LED-termékek (LED-tok, modul, lámpa, lámpatest, világítástechnikai rendszer) esetében gyorsítsuk fel a fejlesztést az ún. virtuális prototípusok szimulációs vizsgálata révén. Ennek lényege, hogy pl. egy adott lámpatestet, alkalmas LED-modellek és szimulációs programok felhasználásával (lásd az előző szakaszt), különböző működési körülmények közt is kipróbálhassunk, miáltal – legalábbis a tervezés első fázisában – szükségtelessé válhat fizikai prototípusok tervezése, gyártása, és mérése; miáltal egy LED-es termék fejlesztése a jövőben gyorsabb és olcsóbb lehet, mint jelenleg. E virtuális prototípus koncepcióra mutatunk be egy elképzelt példát legfrissebb folyóiratcikkünkben^[30].

A konzorcium tagjai azt remélik, hogy a Delphi4LED módszertan ugyanolyan elfogadottá válik a világítástechnikai iparban, ahogy a DELPHI módszertan elfogadottá vált az elektronikai iparban. A DELPHI módszertant, lévén Európában fejlesztették ki, az európai félvezetőgyártók kezdték először alkalmazni. A módszer szabványosítása idejében már létező, kiterjedt modellkönyvtáraik révén előnyre tettek szert az Európán kívüli versenytársaikkal szemben. A Delphi4LED projekt kapcsán hasonló reményeket táplálunk: a nagy hozzáadott értéket képviselő, sok tervezési munkát igénylő, magasabb integráltsági fokú megoldások tervezése gyorsabb és olcsóbb lehet, a termékek minősége – a pontos, szimulációkkal igazolt, helyes méretezés következtében – jobb lehet az Európán kívüli versenytársak LED-es termékeinél.

Az elkövetkezendő évek munkájának sikerét majd az jelzi, ha a „Designed by Delphi4LED” megjelölés ugyanolyan, a jó minőségre utaló megkülönböztető védjeggyé válik,

**Delphi4LED - A méréséktől a LED-ek szabványos multi-domain kompakt modelljeig:
szimulációsmodellek fejlesztése a szilárdtest világítástechnikai ipar beszállítói láncának
különböző szereplői számára**



mint amilyen az „ENERGYSTAR”^[131] címke az elektronikai berendezések energiafogyasztása tekintetében.

Köszönetnyilvánítás

A Delphi4LED projektet az Európai Unió

H2020 kutatási, fejlesztési és innovációs keretprogramja támogatja az ECSEL 692465 sz. szerződés keretén belül, amelyet kiegészít a Nemzeti Fejlesztési, Kutatási és Innovációs Alap NEMZ_16-1-2017-0002 sz. támogatási szerződés keretén belül nyújtott társfinanszírozása.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Gordon E. Moore, "Cramming More Components onto Integrated Circuits", *Electronics*, pp. 114–117, April 19, 1965, reprinted in *Proc. of the IEEE* 86(1): 82-85 (1998)
- [2] Moore törvénye, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Moore's_Law
- [3] Roland Haitz, Jeffrey Y. Tsao, "Solid-state lighting: 'The case' 10 years after and future prospects", *Physica status solidi (a)* 208(1): 17-29 (2009)
- [4] Haitz törvénye, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Haitz's_Law
- [5] Tarnay K., Székely V.: "A TRANZ-TRAN nemline-áris áramköranalízis program", In: 3. Országos Elektronikus Műszer- és MérésTechnikai Konferencia, 1972. március 13-16, Budapest, Magyarország, pp. 11-18.
- [6] V. Székely, K. Tarnay: "Accurate Algorithm for Temperature Calculation of Devices in Nonlinear-Circuit-Analysis Programs", *Electronics Letters* 8:(19) pp. 470-472. (1972)
- [7] V. Székely, A. Poppe: "Novel Tools for Thermal and Electrical Analysis of Circuits", *Electrosoft* 1(4): 234-252. (1990)
- [8] V. Székely, A. Poppe, M. Rencz, A. Csendes, A. Páhi, "Electro-thermal simulation: a realization by simultaneous iteration", *Microelectronics Journal* 28(3): 247-262. (1997)
- [9] H. I. Rosten et al, "Final report to SEMITHERM XIII on the European-funded project DELPHI-the development of libraries and physical models for an integrated design environment", In: *Proc. of the 13th SEMITHERM Symposium*, Austin, USA, 1997, ja-nuár 28-30, pp. 73-91
- [10] H.I. Rosten et al, "The world of thermal characterization according to DELPHI-Part I: Background to DELPHI", *IEEE Tr. on Components, Packaging, and Manuf. Tech. Part A* 20(4): 384-391 (1997)
- [11] C. J. M. Lasance et al, "The world of thermal characterization according to DELPHI-Part II: Experimental and numerical methods", *IEEE Tr. on Components, Packaging, and Manuf. Techn. Part A* 20(4): 392-398 (1997)
- [12] JEDEC Standard JESD15-1, "Compact Thermal Model Overview" (2008)
- [13] JEDEC Standard JESD15-4, "DELPHI Compact Thermal Model Guideline" (2008)
- [14] C. J. M. Lasance, "Highlights from the European thermal project PROFIT", *Journal of Electronics Packaging* 126(4): 565-570 (2004)
- [15] C. J. M. Lasance, "The European project PROFIT: prediction of temperature gradients influencing the quality of electronic products", In: *Proc. of the 17th SEMITHERM Symposium*, 2001. március 20-22, San Jose, USA, pp. 120-125
- [16] C. J. M. Lasance, "Ten Years of Boundary Condition Independent Compact Thermal Modeling of Electronic Parts: A Review", *Heat Transfer Eng.*, 29: 149-168 (2008)
- [17] JEDEC Standard JESD15-1, "Integrated Circuits Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device)" (1995)
- [18] Mentor Graphics MicReD TeraLED műszer <https://www.mentor.com/products/mechanical/micred/teraled/>
- [19] Poppe András: "Teljesítmény LED-ek új termikus mérési szabványai", In: *Világítástechnikai Évkönyv 2012-2013*, Budapest: MEE VTT, 2013, pp. 96-102
- [20] CIE, "Measurement of LEDs", CIE 127:2007 (2nd edition), ISBN 978 3 901 906 58 9
- [21] G. Farkas et al, "Thermal Investigation of High Power Optical Devices by Transient Testing", *IEEE Tr. on Components and Packaging Techn.* 28(1): 45-50 (2005)
- [22] A. Poppe et al, "Multi-domain simulation and measurement of power LED-s and power LED assemblies", In: *Proc. of the 22nd SEMI-THERM Symposium*, 2006. március 14-16, Dallas, USA, pp. 191-198
- [23] Poppe A., et al, "LED-ek multi-domain szimulációs modelljei és azok gyakorlati vonatkozásai", In: *Világítástechnikai Évkönyv 2014-2015*, Budapest: MEE VTT, 2015, pp. 112-121.
- [24] A. Poppe, "Multi-domain compact modeling of LEDs: an overview of models and experimental data", *Microelectronics Journal* 46(12A): 1138-1151. (2015)
- [25] A Delphi4LED projekt honlapja: delphi4LED.org
- [26] A CIE műszaki bizottságai: <http://www.cie.co.at/index.php/Technical+Committees>
- [27] A JEDEC [C]15-ös munkabizottsága szakterületei: <https://www.jedec.org/committees/jc-152-2>
- [28] A. Poppe et al, "Creating multi-port thermal network models of LED luminaires for application in system level multi-domain simulation using Spice-like solvers", In: *Proc. of the 32nd SEMI-THERM Symposium*, 2016. március 14-17, San Jose, USA, pp. 44-49.
- [29] A. Poppe, "Simulation of LED Based Luminaires by Using Multi-Domain Compact Models of LEDs and Compact Thermal Models of their Thermal Environment", *Microelectronics Reliability* 72(5): 65-74 (2017)
- [30] Hegedűs J., Poppe A., "Közvilágítási lámpatestek karakterizálása multi-domain LED modellekkel – a LED karakteriztikáktól a lámpatest üzemi fényáramáig", *Elektrotechnika* 110(3-4): 13-20 (2017)
- [31] R. Bornoff et al, "Delphi4LED - From Measurements to Standardized Multi-Domain Compact Models of LEDs: a New European R&D Project for Predictive and Efficient Multi-domain Modeling and Simulation of LEDs at all Integration Levels Along the SSL Supply Chain", In: *Proc. of the 22nd THERMINIC Workshop*, 2016. szeptember 21-23, Budapest, Magyarország, pp. 174-180
- [32] G. Martin et al, "Delphi4LED - From Measurements to Standardized Multi-Domain Compact Models of Light Emitting Diodes (LED)", *Electronics Cooling* 22:(12) pp. 20-23. (2016)
- [33] Energystar honlap: <https://www.energystar.gov/> (legutóbbi hozzáférés: 2017.03.08)