

LED-es közvilágítási lámpatestek termikus tranziens teszteléssel való diagnosztikai vizsgálatának lehetőségei

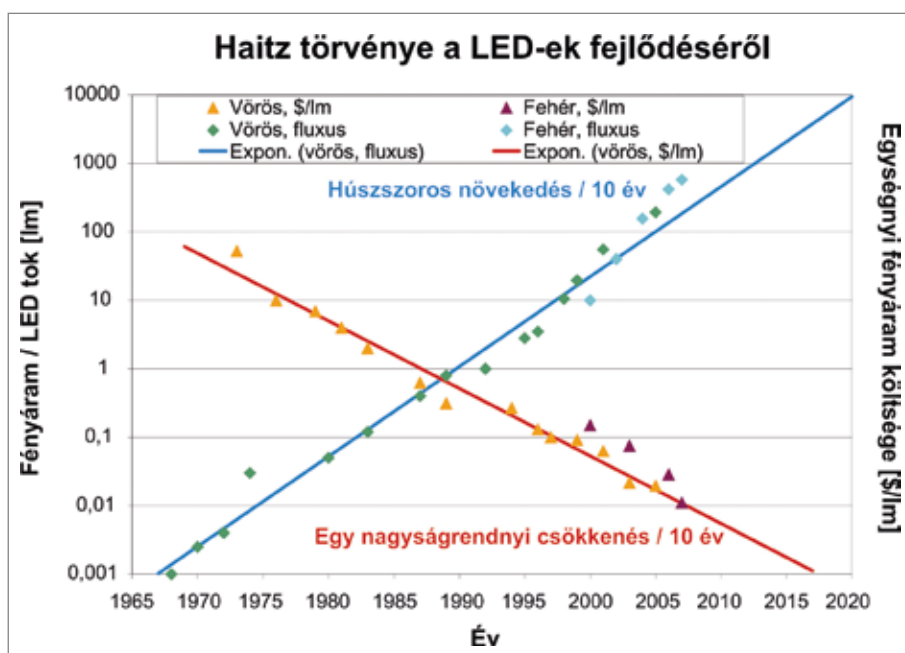
Ebben a cikkben azt vizsgáljuk, hogy milyen olyan mechanikai változások következhetnek be közvilágítási lámpatestekbe szerelt LED-eknél a lámpatest életciklusa alatt, amelyek a lámpatestben működés közben elvégzett termikus tranziens méréssel felderíthetők, és milyen alapvető specifikációkat kell egy, a lámpatestek elektronikai moduljába integrált mérőegységnek kielégíteni ahhoz, hogy ilyen jelegű diagnosztikai méréseket végezhesünk.

A KÖZLED projekten belül a Pannon Egyetemmel közösen végzett öregítési vizsgálataink alapján – amelyekről egy másik közleményben számolunk be – kijelenthető, hogy a LED-ek PN átmenete és a környezet közötti hővezetési útban található termikus határfelületek esetében számos helyen degradáció következhet be. Az ilyen meghibásodások a határfelületek átmeneti hőellenállásának, és ezen keresztül a PN átmenetek hőmérsékletének növekedéséhez vezetnek, ami a LED-ek várható élettartamának csökkenését okozhatja. A chiprogzítás kivételével az ilyen jellegű meghibásodások jó eséllyel észrevehetők kis felbontású termikus tranziens mérésekkel. Ennek jelentősége az, hogy ezen elvet felhasználva a lámpatest élettartama alatt rendszeresen végzett termikus tranziens mérésekkel az ilyen jellegű meghibásodások felderíthetők. A szükséges mérőáramkör a lámpatestek LED meghajtó elektronikájába integrálható, így a lámpatestekben öndiagnosztikai modul alakítható ki. Ennek hibajelzése alapján célzott, tervszerű megelőző karbantartás kezdeményezhető, amivel visszaállíthatók a LED-ek hosszú élettartamát lehetővé tevő működési feltételek, illetve a fatális meghibásodás előtt álló egyes LED-ek még időben kicserélhetők. Az alapelvek ismertetése mellett cikkünkben kitérünk az ilyen öndiagnosztikai méréssel kapcsolatos egyes problémákra is.

In this paper we investigate what kind of failures are likely to happen in LED based streetlighting luminaires and what are the requirements for being able to detect these by means of thermal transient testing. Based on preliminary results of long term stability studies of LEDs performed within the KÖZLED project in cooperation with the Pannon University in Veszprém, Hungary one should expect degradation of different thermal interfaces. Except the die attach, changes of relevant thermal interfaces are likely to be detectable by relatively low resolution thermal transient measurements. The measurement hardware can be realized as an add-on to the LED driver circuitry present in the luminaire which allows implementing self-diagnostic functions. Based on measurement results of such self-diagnostics tests increased interfacial thermal resistances can be detected and preventive maintenance of luminaires can be scheduled which could help restore normal thermal resistance of LED-s or LED-s facing fatal failures can be replaced in due time. Certain challenges such as lack of K-factor calibration of the LEDs to be measured are also discussed.

1. Bevezetés

Manapság világszerte hatalmas változások figyelhetők meg a világítástechnika területén: a szilárdtest fényforrások, különösen a nagy teljesítményű és nagy fényerősségű LED-ek hatásfokuk folyamatos növekedése révén most már felveszik a versenyt a hagyományos fényforrásokkal: fényhasznosításuk mára már meghaladta a kompakt fluoreszcens fényforrásokét, és lassan vetekszik a legjobb gázkisülő lámpák fényhasznosításával. A LED-ek (Haitz törvénye [1], [2] által megfogalmazott) fejlődési trendje hasonlít a hagyományos félvezető ipar Moore-törvényére. A LED-ek esetében az integráció sűrűség helyett egy LED tokból kinyerhető maximális fényáram az egyik meghatározó mérték (1. ábra).

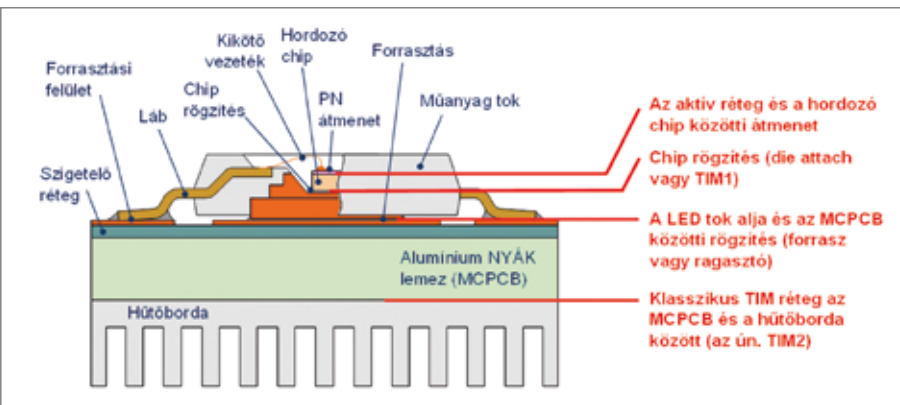


1 ábra A LED-ek fejlődésének trendje Haitz törvénye [1], [2] szerint: exponenciálisan növekvő, egy LED tokból nyerhető fényáram (20-szoros növekedés 10 év alatt, valamint egységnyi fényáram exponenciálisan csökkenő költsége. Az ábra a [3] forrásban megjelent eredeti magyar nyelvű változata.)

Jelenleg a LED-es fényforrások piaci ára még mindig magasabb, mint a hagyományos fényforrások ára, ennek ellenére a LED-alapú világítási megoldások gyors terjedése figyelhető meg. A LED-ek meghódították pl. a díszvilágítás vagy a jelzőfények piacát, elterjedtek egyes autópári alkalmazásokban és az elmúlt években megjelentek általános bel- és kültéri alkalmazásokban is, beleértve a közvilágítást is. Ennek egyik oka a nagy várható élettartam mellett az energiatakarékosságban rejlik. Egy másik aspektus a LED-ek kisméretűségű működése, amely egyszerűbbé teszi a digitális vezérlési megoldások alkalmazását. Ezek olyan előnyök, amelyek már kompenzálják a LED-es fényforrások ma még mindig nagyobb árát.

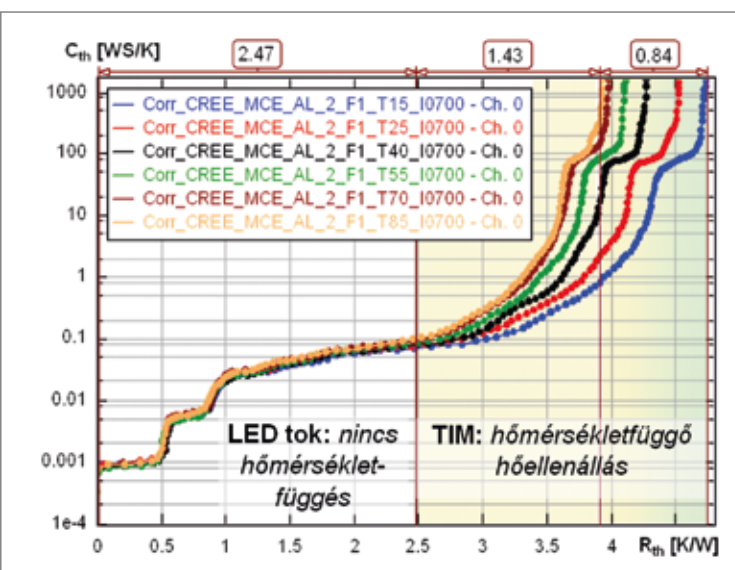
A LED-ek alkalmazásának egyik legnagyobb problémája, hogy várható élettartamuk és fénykibocsátásuk erősen függ a LED-ek PN átmenetének hőmérsékletétől. A működés során keletkező hő a LED-chipből a tokozáson keresztül csak hővezetéssel távozik, tipikusan egy hűtőborda vagy a LED-et tartalmazó lámpatestház felületére, ahonnan többnyire természetes konvekció útján adódik át a környezetnek. A konduktív hőtranszfer a félvezető-átmenettől a hűtő szerelvényig vagy lámpatestig számos termikus határfelületen

halad keresztül (lásd. 2. ábra). Ezen termikus határfelületek degradációja, mint például az érintkező felületek egymástól való elválása (az ún. delamináció) vagy a termikus határfelületi anyagok (thermal interface materials – TIM) öregedése megnöveli a hőellenállást, ami a LED-chip nagyobb hőmérsékletéhez vezet. Ez a kibocsátott fény azonnali csökkenését okozza, hosszab távon pedig az élettartam rövidülését eredményezi, extrém esetben akár fatális meghibásodást is eredményezhet.



2. ábra Egy LED PN átmenete és a termikus környezet közötti hővezetési útból álló felépítés és a hűtőborda közötti hővezetési útban előforduló termikus határfelületek.

A Székely Vladimír akadémikus és munkatársai által az elmúlt több mint két évtizedben kidolgozott és ipari módszerrel fejlesztett termikus tranziens tesztelés, mint mérési eljárás, alkalmas módszernek kínálkozik LED-es fényforrások, lámpatestek élettartam alatti hibadiagnosztikájára, monitorozására is. A következő fejezetekben ezen alagondolat (amely szerint magukat a LED-eket használjuk hőmérsékletérzékelőként) megvalósíthatóságának különböző aspektusait vizsgáljuk LED-es közvilágítási lámpatestek esetében. Egyrészt áttekintjük a LED-es közvilágítási lámpatestekben várható azon meghibásodások fajtáit, amelyek termikus tranziens mérésekkel jó eséllyel detektálhatóak, másrészt megpróbálunk feltételeket megadni ezen problémák detektálhatóságára.



3. ábra Egy fém magvas nyomtatott huzalozású lemeze szerelt 10 W-os fehér LED junction-to-ambient hővezetési útjának ún. struktúra függvénye (hőellenállás-hőkapacitás térképe) [Az ábra paramétere T- a környezeti hőmérséklet] [4]

2. LED-ek termikus jellemzése a tervezés fázisában

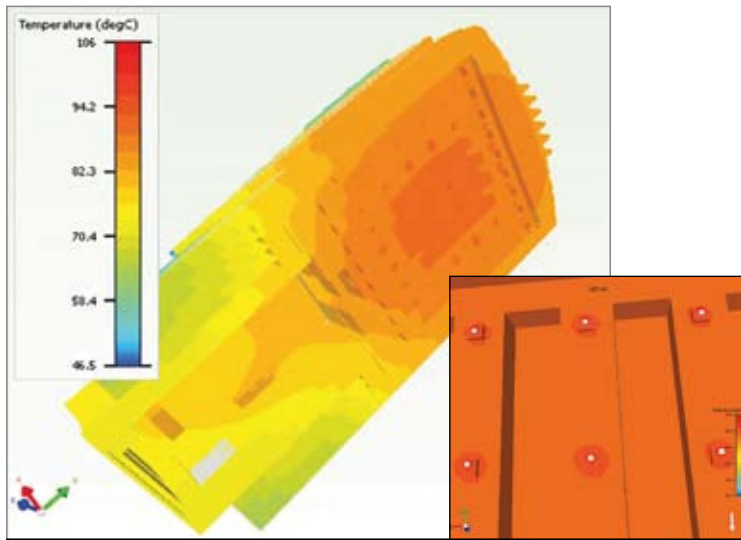
Egy korábbi cikkünkben [4] részletesen tárgyaltuk különböző gyártók fehér LED-jei esetében a közvilágítási lámpatesteknél szóba jöhető különböző szereléstechológiai megoldások termikus minősítésének módszertanát. A szereléstechológiai megoldások hővezetési tulajdonságainak feltárása mellett méréseinkkel meghatároztuk ezen LED-ek teljes fényáramát a PN átmenet aktuális hőmérséklete függvényében annak érdekében, hogy pontos adatok álljanak rendelkezésre a lámpatest szintű optikai tervezéshez. (Méréseink során, mintegy "melléktermékként", a szinkordináták, illetve/és a korrelált színhőmérséklet hőmérsékletfüggését is megállapítottuk.) A 3. ábrán bemutatott ún. *struktúrafüggvények* kombinált termikus és radiometriai/fotometriai mérésekből származnak. A mérés elvéből következik, hogy a vizsgált LED-ek munkapontváltozásai következtében fellépő energiakonverziós hatáskválcózás hatásait az eredmények önkonzisztens módon tükrözik. LED-ek együttes termikus és radiometria méréseit már korábban javasoltuk a LED-ek termikus minősítésének szabványosítása kapcsán [5], [6]. Ezek a mérések rávilágítottak arra, hogy azok a

termikus határfelületi anyagok, amelyeket a lámpatest és a hordozó (pl.: MCPCB – fémmagvas nyomtatott huzalozású lemez) között alkalmaznak, megváltoztathatják a tulajdonságaikat. Valószínűsíthető, hogy a lámpatest és az MCPCB közötti termikus határfelületi anyag tulajdonságai függhetnek pl. a környezeti hőmérséklettől, és időben is változhatnak (öregedés). Ez utóbbi feltételezést a jelenleg is folyó hosszú távú stabilitási vizsgálatok eredményei [7] megerősítik.

3. LED-ek hosszú távú stabilitása

A veszprémi Pannon Egyetemmel együttműködve teljesítmény LED-ek hosszú távú megbízhatósági vizsgálatait [7] végezzük. A Pannon Egyetem kutatócsoportja a LED-ek hosszú távú fénykibocsátási stabilitását vizsgálja az IESNA LM80 fénymérési szabvány [8] előírásainak megfelelően. A Veszprémben folyó stabilitási vizsgálatokban két okból veszünk részt. Egyrészt meg vagyunk arról győződve, hogy pl. a fehér LED-ekben alkalmazott fénypor és a LED-tokokba integrált lencsék öregedése mellett a LED-ek hőellenállásának megváltozása is hozzájárulhat a fényáram csökkenéséhez. Másrészt érdekel minket, hogy milyen struktúrális változások mennek végbe egy LED-tokban a LED élettartama során. Ezért a vizsgálatokban szereplő LED-mintákon termikus tranziens méréseket és struktúrafüggvény-analízist végeztünk, kezdetben 500 óránként, később 1000, illetve 1500 óránként. (Az öregítés ideje jelenleg már a 8000 órát is meghaladja.) Az LM80 szabvány szerint a vizsgált LED-eket 85 °C-os hőmérsékleten névleges nyitóárammal (tipikusan 350 mA-rel) kell járatni. A LED-ek jellemző paramétereit 55 °C-os és 85 °C-os, valamint egy szabadon megválasztott, harmadik hőmérsékleten – amely esetünkben 25 °C – kell rendszeres időközönként mérni. Felmerülhet a kérdés, hogy az öregítés során alkalmazott 85 °C-os környezeti hőmérséklettel valójában gyorsított öregítést hajtunk-e végre,

¹ A vizsgált lámpatest a HungaroLux Kft. PearlLight lámpatestcsaládjának egy tagja volt.



4. ábra A FloTHERM® program [9] segítségével egy LED-es közvilágítási lámpatestre elvégzett CFD alapú termikus szimuláció eredményei igazolták az LM80-as szabvány szerinti öregítési hőmérséklet életszerűségét: a lámpatest házában elhelyezkedő LED tokok case hőmérséklete 85 °C körüli értékre adódott

vagy ez a hőmérséklet jellemző a LED-ek valós működési körülményeire?

A kérdés eldöntésére ún. CFD (computational fluid dynamics) analízist végeztünk egy tényleges LED-es lámpatest esetében¹, amely 48 db fehér fényű teljesítmény LED-et tartalmazott. A lámpatest teljes villamos teljesítményfelvétele 150 W volt. A hőterhelés kiszámításakor figyelembe vettük a LED tápegység és meghajtó elektronika gyártó által specifikált veszteségeit, valamint a LED-ek tényleges disszipációját is. Ahhoz, hogy a valós disszipációval számolhas-

sunk a LED-ek esetében, az elektromos teljesítményből levontuk a (saját méréseinkkel meghatározott) kisugárzott fényteliítményt. A lámpatestek hűtésénél is a legrosszabb esetet vizsgáltuk úgy, hogy csak természetes konvekciót és 35 °C-os környezeti hőmérsékletet feltételeztünk. A szimulációs modellben a LED-eket egy egyszerűsített, ún. kompakt termikus tok modellel vettük figyelembe, ahol a LED gyártó által az adatlapban megadott LED-tok (saját méréseinkkel is igazolt) junction-to-case hőellenállás értékével számoltunk. A tényleges szimulációt a lámpatestház öntőformájának CAD modelljéből létreho-

zott szimulációs modellt felhasználva, a Mentor Graphics® cég FloTHERM® programjával végeztük. A 4. ábrán bemutatott szimulációs eredmények alapján elmondható, hogy az LM80-as tesztek hőmérsékleti követelményei jól reprezentálják a lámpatestben elhelyezett LED-ek működési körülményeit: a szimulációk során a lámpatestbe szerelt LED-tok hőmérséklete 85-95 °C körüli értékre adódott.

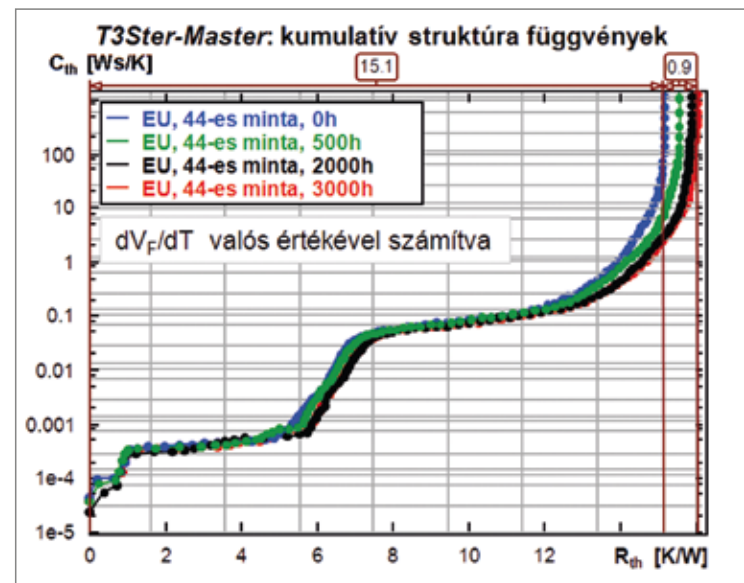
Az élettartam-vizsgálatok részeként termikus tranzien্স méréseket és struktúrafüggvény-analízist végzünk minden egyes, az LM80-as öregítő kamrában (5.a ábra) felszerelt LED esetében. A kamrában 60 db, vezető európai és észak-amerikai gyártóktól, valamint egy ún. "noname" gyártótól származó LED-et öregítünk. A vizsgálatok során a relatív fényáram és színindex összetevők mérése (5b. ábra) és a spektrum mérések, valamint a termikus tranzien্স mérések (5c. ábra) *in-situ* módon történnek, így a LED-eket nem kell a mérések elvégzése érdekében az öregítő környezetből elmozdítani. Ennek az a jelentősége, hogy a termikus tranzien্স mérések kiértékeléseképpen előálló struktúrafüggvények segítségével a LED-ek hővezetési útjában megfigyelhető változások biztos, hogy kizárólag csak az öregedés következtében fellépő mechanikai változásokat jelzik.

Az öregítési vizsgálatok közben végzett méréseink tehát fontos információt szolgáltatnak arra vonatkozólag, hogy milyen hibák megjelenését tételezzük fel egy LED élettartama során. A 6. ábrán a már említett öregítési vizsgálatok egyes mérési eredményei láthatóak. Az ábrán olyan struktúrafüggvényeket mutatunk be, amelyek a kiválasztott LED-minták PN átmenetétől a környezetig terjedő hővezetési útjának az állapotát mutatják 0, 500, 2000, és 3000 órási öregítést követően (sorrendben a kék, piros, fekete, zöld görbék).

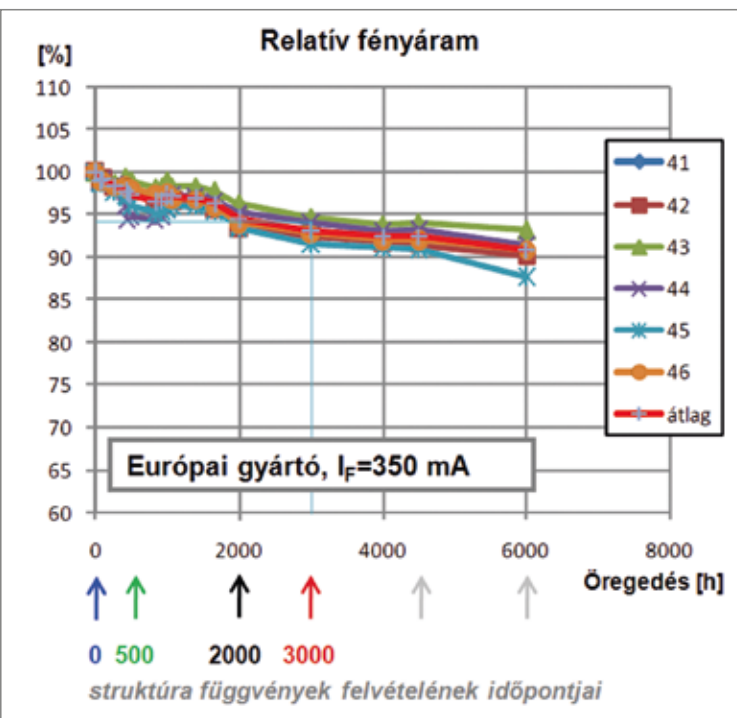
A 6.a ábrán (európai gyártó, 44-es minta) látható, hogy az egyes görbék szinte tökéletesen együtt futnak, kivéve az utolsó szakaszt, amely a LED-hordozó (MCPCB) és a kamra konstans hőmérsékletű alja közötti vékony TIM-paszta (szó-
kásosan: termikus zsír) rétegnek felel meg. Ez az ábra arra



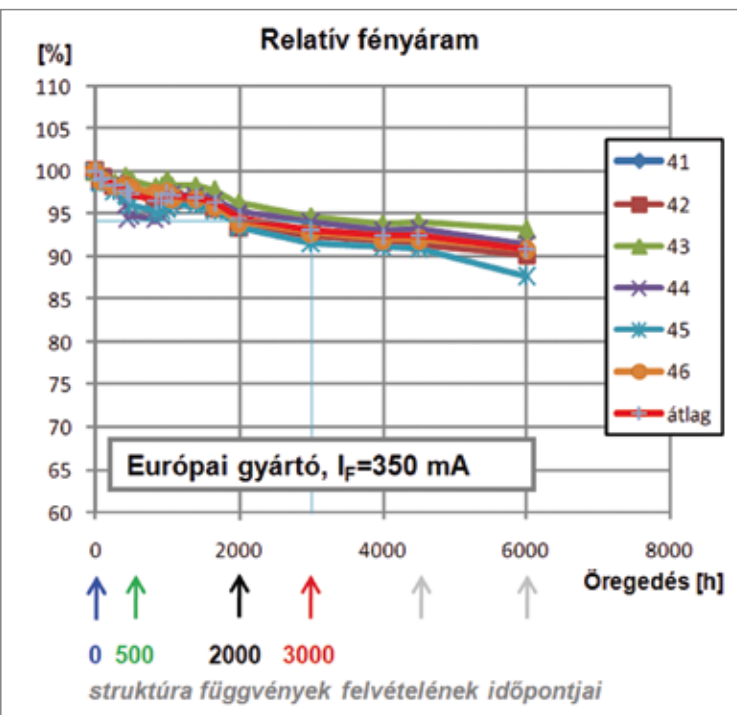
5. a, b, c ábra Az LM80-as szabványnak megfelelő öregítő berendezés: a) 60 LED az öregítő kamra belsejében és a kamra stabil hőmérsékletét biztosító folyadékos termosztát, b) integráló csővel történő relatív fényáram és színindex-összetevő mérése helyben, c) termikus impedancia mérése a T3Ster® nevű berendezéssel [14], szintén helyben



6. ábra LM80 szabvány szerinti élettartam vizsgálatok során született mérési eredmények: a) Egy európai LED gyártó egyik LED mintája esetében 0, 500, 2000 és 3000 órási öregítés után mért termikus tranzien্সekből számított struktúra függvények – a TIM anyag öregedését mutatják, b) Ugyanezen gyártó LED-jeinek relatív fényáram változása (a veszprémi Pannon Egyetem fénytani laboratóriumának szíveségéből)



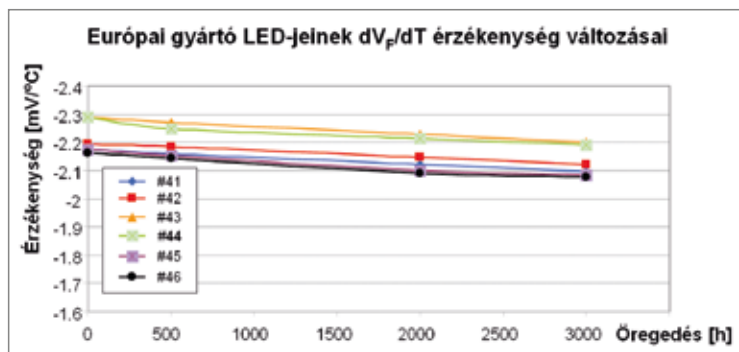
6. b ábra



6. c ábra

utal, hogy 500 óra üzemidő alatt LED-ek szerelésekor használt konvencionális termikus zsír elkezdi öregedni, és 3000 óra elteltével a teljes R_{thJA} hőellenállás kb. 6%-os növekedését okozza.

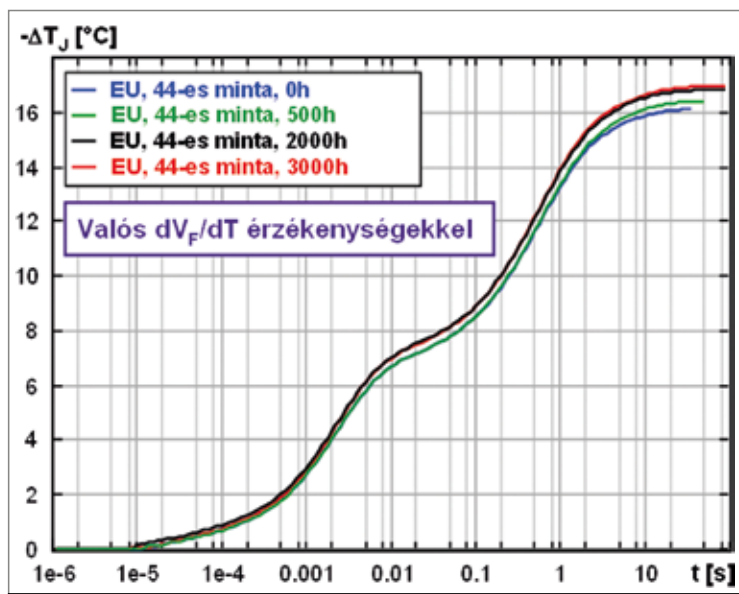
A vizsgálatok során a LED-ek nyitófeszültségének mérése is szokásos – ez a mi esetünkben is, a már említett három különböző hőmérsékleten (25 °C, 55 °C és 85 °C-on) történt. Ezen mérések alapján minden egyes LED nyitófeszültségének hőmérséklet érzékenysége meghatározható. (Ezen érzékenység reciproka az ún. "K-factor" [11]). A JEDEC JESD51-1 jelű szabványon [10], [11] alapuló termikus tranziens mérések során ezen érzékenységek segítségével határozhatjuk meg a kényszerített áram mellett mért, termi-



7. ábra Egy európai gyártó LED mintáinak nyitófeszültség hőmérséklet érzékenység változásai az öregítés során; 0, 500, 2000 és 3000 óra öregedési idő elteltével

kusan keltett nyitófeszültség-változásokból a PN átmenetek hőmérsékletváltozását, az ún. hőmérséklettranzienst, amiből egy többlépcsős numerikus eljárással állíthatók elő az ún. struktúrafüggvények.

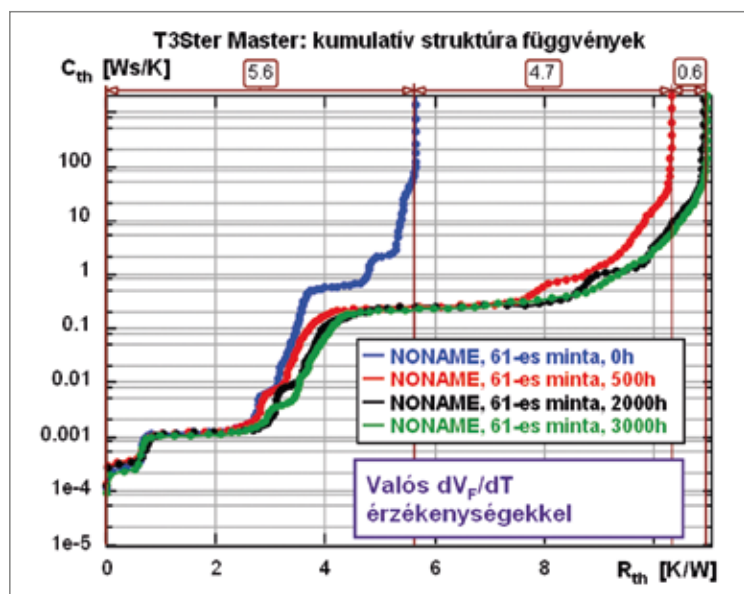
A 7. ábra az európai LED gyártó összes LED-mintájának nyitófeszültség hőmérsékletérzékenység-változását ábrázolja az öregítési idő függvényében. A 8. ábrán ugyanezen LED-minta PN átmenet hőmérséklettranzienzeit láthatjuk². (A 6. ábrán látható struktúrafüggvényeket ezen hőmérsékleti tranziensek alapján állítottuk elő.)



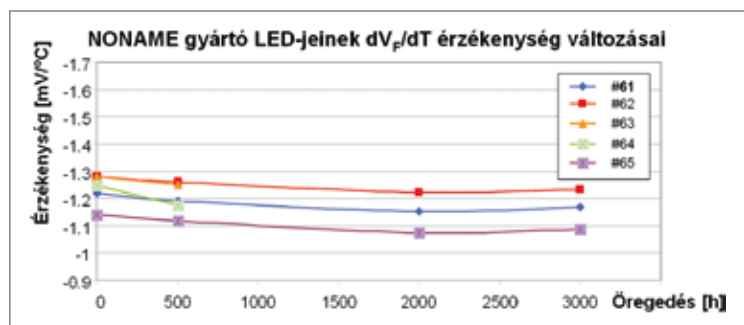
8. ábra Egy európai gyártó egyik LED mintája PN átmenet hőmérséklet tranziensei a nyitófeszültség hőmérséklet érzékenységének pontosan kalibrált értékeivel mérve; 0, 500, 2000 és 3000 óra öregedési idő elteltével

A 8. ábrán látható, hogy a tranziens függvények kb. 2 ms-ig közel együtt futnak, és csak ezt követően térnek el egymástól kis mértékben. A kezdeti és az 500 órás görbék jól fedik egymást, de a 2000 órás és a 3000 órás mérések görbéi 1 ms-tól kezdve kis mértékben már eltérnek egymástól. A görbék közti különbség 1 s környékén megnövekszik. Megfigyelhetjük azt is, hogy 3 s körül az öregítési vizsgálatok kezdetekor (0 órakor) mért tranziens és az 500 órás görbe is eltér már egymástól. A fent már említett, mintegy 6%-os teljes hőellenállás-növekedés magukról a tranziens görbékről is leolvasható.

² Tokozott félvezetők 1W-os disszipáció változásra normált junction hőmérséklet tranziensét termikus impedancia függvénynek nevezzük.



9. ábra Egy NONAME gyártó egyik LED mintájának junction- to-ambient hővezetési útját jellemző struktúra függvények 0, 500, 2000 és 3000 óra öregítés után, a nyitófeszültség hőmérséklet érzékenységeinek valós, kalibrált értékével számítva



10. ábra Egy NONAME gyártó LED mintáinak nyitófeszültség hőmérséklet érzékenység változásai az öregítés során; 0, 500, 2000 és 3000 óra öregedési idő elteltével

Megjegyezzük, hogy az imént tárgyalt LED-minta hőellenállás-változása, nyitófeszültsége hőmérsékletérzékenységének változása és relatív fényáramának változása az első 3000 órás öregedési időszakban nagyjából azonos nagyságrendű volt (kb. 5-6%). Egy másik, "noname" gyártó esetében ennél sokkal nagyobb eltérések is megfigyelhetők voltak. A 9. ábrán egy, a mért nyitófeszültség tranziens alapján tényleges hőmérsékletérzékenységgel számolt struktúrafüggvény sorozatot mutatunk be. Ezen LED esetében 500 óra öregítés után 84%-kal nőtt a hőellenállás értéke. 3000 órás égetési idő elteltével a hőellenállás 95%-kal nőtt a kiindulási értékhez képest, miközben a nyitófeszültség hőmérséklet érzékenysége változása összesen 5,6% volt (10. ábra)

A vizsgált "noname" LED-minták esetében jelentős fényáramcsökkenés lépett fel, ezért ezen "noname" gyártó egyes mintái már nagyon korán kikerültek az öregítő berendezésből, mert relatív fényáramuk a 70%-os érték alá csökkent³. (A 10. ábrán ezért nincsenek további dV_F/dT érzékenység adatok 2000 és 3000 óránál). Ebből a LED-típusból a legtovább működőképes példányok élettartama is csupán kb. 4500 óra volt.

Közvilágítási lámpatestek esetében a különböző termikus határfelületek (pl. a LED-tok és az azt hordozó MCPCB, vagy

az MCPCB és a lámpatestház közötti felületek) delaminációját nem feltétlenül a magas hőmérséklet, vagy a napi hőmérsékletingadozás, illetve hőmérsékleti gradiensek keltette mechanikai feszültség okozza. Kiváltó okként szóba jöhet pl. a lámpatesteket érő vibráció vagy egyéb szélsőséges környezeti hatások (pl. magas páratartalom). Ezen hatásokra vonatkozólag még nem rendelkezünk kísérleti adatokkal, de a KÖZLED projekten belül tervezzük ilyen jellegű vizsgálatok elvégzését is.

4. LED-es lámpatestek terepi diagnosztikája

Egy közvilágítási lámpatest valós, külső környezeti feltételei legalább olyan kemények, mint az LM80-as tesztkamra által az öregítés során biztosított felételek. Az öregítési vizsgálatok eddigi eredményei alapján joggal kijelenthető, hogy egy LED-es közvilágítási lámpatestben az egyes LED-ek PN átmenetétől a lámpatestházig terjedő hővezetési útban számos, a beépített LED-ek élettartamának csökkenését okozó struktúrális változás következhet be. A termikus tranziens tesztelés tehát egy lehetséges eszköz arra, hogy korai szakaszban felderítsük ezeket a változásokat, így egy öndiagnosztikai vizsgálat korai figyelmeztetése alapján a közvilágítási berendezések üzemeltetője célzott, tervszerű megelőző karbantartást tud végezni.

A mai, szokásos LED-es lámpatestekben a LED-ek törpefeszültségű DC táplálásúak, ezért minden lámpatestben tápegységet és LED meghajtó áramkört is találhatunk. (Ezek élettartam- és hatásfokproblémái meghaladják jelen írás kereteit, így ezekkel a problémákkal nem foglalkozunk.) Amint a bevezető részben már utaltunk rá, a LED-ek elektromos tulajdonságai lehetővé teszik, hogy különféle vezérlési és diagnosztikai funkciókat is integráljunk a LED meghajtó áramkörökbe. Ilyenek lehetnek például a(z) intelligens) fényáram-szabályozás; a tápvezetéken történő kommunikáció, további információ-/adatgyűjtő és diagnosztikai funkciók; stb.

4.1. Mérés a fényáram-szabályozás közben

A LED-ek fényáram-szabályozása nagyon gyakran impulzus szélesség modulációval (PWM) történik. Ennek előnye az lehet, hogy a LED-eket folyamatosan a fényhasznosítás szempontjából legelőnyösebb nyitóárammal tápláljuk, mégis átlagos fényáramuk a nagyfrekvenciás négyeszőgjel kitöltési tényezőjével tág határok közt változtatható. A PWM jel frekvenciája 10 kHz nagyságrendű, ami elég lassú ahhoz, hogy a LED fénykibocsátásával követni tudja azt, ugyanakkor elég gyors ahhoz, hogy az emberi szem integrálja a fényt. A ki-/bekapcsolás ilyenkor kellő méretű, a LED-ek ún. *in-line* tesztelésénél alkalmazottal azonos nagyságrendű, kb. 10 ms-os időablakot eredményez ahhoz, hogy termikus tranziens mérést is végezhesünk [12]. Székely Vladimír professzor egy viszonylag új publikációja [13] implicit módon leírja, hogy ha a hővezetési út egy adott, τ termikus időállandóval jellemezhető struktúrális elemét termikus tranziens méréssel minősíteni szeretnék, akkor az adott időállandó legalább két dekádnyi környezetéből, azaz legalább a $[0,1-\tau, 10-\tau]$ inetrvallumból származó pontos mérési eredményekre van szükség. Ez a karakterisztikus termikus időállandó és a termikus tranziens mérés lehetővé tevő időablak mérete közötti kényszerkapcsolat azt eredményezi, hogy jobbára csak a LED-chip rögzítés (az ún. *die attach*) minőségét jellemző időállandó nagyságrendjében tudnánk PWM dimmelés esetében mérni. A mérés időablaka mellett a termikus tranziens mérés

³ LED-ek élettartamát tipikusan a 70%-os fényáram eléréséig definiálják. Pontosabban, az ún. L70-B50-es diagramok azt az élettartamot mutatják, amelyenél a vizsgált LED populáció 50%-ának fényárama a kezdeti érték 70%-a alá csökken.

időbeli felbontása is bizonyos követelményeknek eleget kell tessen: ebben a termikus időállandó intervallumban az mikroszekundum nagyságrendű kell legyen. Ez a specifikáció a ma kapható legfejlettebb laboratóriumi termikus tranziens mérőberendezések (pl. [14]) specifikációjának felel meg, ezért a PWM alapú fényáram-szabályozással kombinált termikus tranziens mérés megvalósítása nem reális célkitűzés. Tekintve, hogy „die attach delaminációt” eddig nem mutattunk ki az LM80-as szabvány szerinti öregítéses vizsgálatok során, ez nem jelent különösebb veszteséget a LED-es közvilágítási lámpatestek terepi öndiagnosztikai mérései szempontjából.

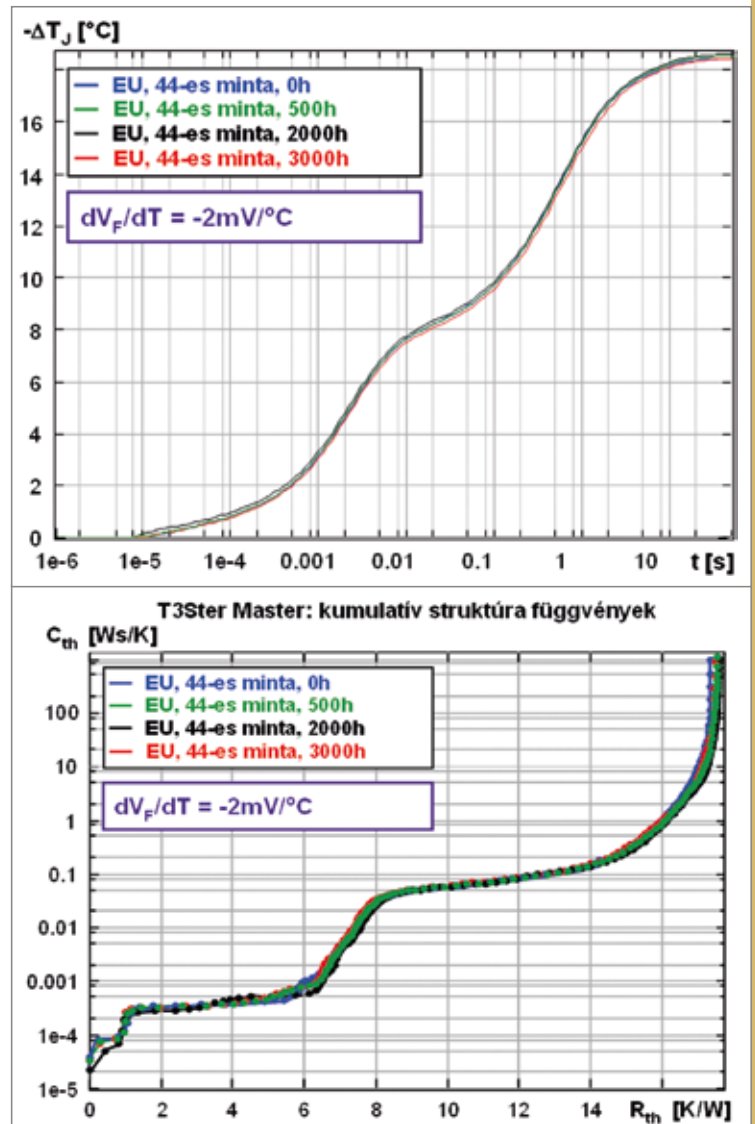
4.2. Ütemezett termikus mérések

A nem túl távoli jövőben a lámpatestek várhatóan tartalmaznak majd valamilyen vezérlő logikát és kommunikációs áramköri modulokat is, ezért megvalósíthatónak tűnik a klasszikus, JEDEC JESD51-1 szabványon [11] alapuló termikus tranziens mérési megoldás implementálása egy lámpatestben. Ekkor a lámpatestben egyébként is megtalálható vezérlő áramkör alkalmas kiegészítésével lehetővé válhat, hogy nappal az egyes LED-eket vagy a LED tömb egyes sorait néhány percre bekapcsoljuk, majd egy kis, 10 mA nagyságrendű mérő áramot szolgáltató áramgenerátorra átkapcsolva, azok hűlési tranzienseit mérünk. Az öregítéses vizsgálatok során tapasztalt, termikus tranziens méréssel kimutatható elváltozások (pl. a LED-tok és az MCPCB, vagy az MCPCB és a lámpatestház közötti delamináció) detektálásához a 0,1 s-nál nagyobb termikus időállandókat kell tudnunk „megfognunk”. Egy ilyen méréshez elegendő ms-os időbeli felbontással mérni. Az ehhez szükséges mérőáramkör megvalósítása gazdaságilag is reális.

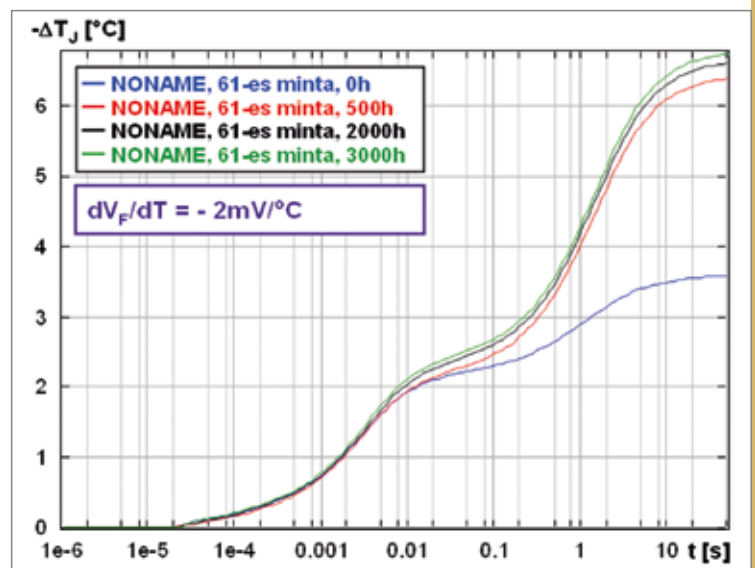
4.3. Termikus tranziens mérésen alapú öndiagnosztika problémái

A JEDEC JESD51-1 [11] szabvány előírja, hogy a félvezető eszközt a termikus mérést megelőzően kalibrálni kell. Ez a kalibráció a félvezető eszköz hőmérsékletérzékeny paramétere (TSP – *temperature sensitive parameter*; diódák, LED-ek esetében a kényszerített, konstans áram esetén mérhető nyitófeszültség) pontos hőmérsékletfüggésének megállapítását jelenti. Ez azonban egy tömegtermék esetében (mint pl. a LED-es lámpatestek) nem lehetséges⁴. Még ha a kalibrálást el is végezzük a gyártás során, a nyitófeszültség hőmérsékletérzékenysége időben változik, ahogy ezt a 7. és a 10. ábrán már korábban bemutattuk. Ezért a terepen végzett termikus tranziens mérések során csak a nyers nyitófeszültség tranziensek feldolgozására van lehetőségünk, azokat nem tudjuk pontos PN átmenet hőmérséklet tranzienssé konvertálni.

Ha kizárólag csak mechanikai meghibásodást szeretnénk kimutatni a mért nyitófeszültség tranziensek alapján, akkor a fent említett nyitófeszültség érzékenységváltozás következtében ezen meghibásodások detektálhatósági problémájára kell számítanunk. A 11. ábra a korábban már vizsgált, európai gyártótól származó 44-es jelű LED-minta mérési eredményeit mutatja abban az esetben, ha csak egy konstans, tipikusan $-2 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ -os érzékenységgel számolunk a nyitófeszültség tényleges hőmérsékletérzékenysége helyett. Mivel e minta esetében a hőellenállás változása és a nyitófeszültség hőmérsékletérzékenysége változása azonos nagyságrendű, de ellenkező előjelű, ezért a teljes



11. ábra Egy európai gyártó egyik LED mintája PN átmenet hőmérséklet tranziensei (0, 500, 2000 és 3000 óra öregedési idő elteltével) és struktúra függvényei a nyitófeszültség hőmérséklet érzékenysége kalibrálatlan, állandónak feltételezett értékével mérve, illetve számítva



12. ábra Egy NONAME gyártó egyik LED mintája PN átmenet hőmérséklet tranziensei (0, 500, 2000 és 3000 óra öregedési idő elteltével), a nyitófeszültség hőmérséklet érzékenysége kalibrálatlan, állandónak feltételezett értékével mérve

⁴ Hasonló problémával szembesülünk a LED-ek termikus tranziens mérésen alapuló gyártósori tesztelése esetében is [12].

hővezetési út hőellenállásának megváltozása a mért nyers nyitófeszültség tranziens alapján nem mutatható ki. Amennyiben a hőellenállás változása sokkal nagyobb, mint a nyitófeszültség hőmérsékletérzékenységeinek változása, akkor a hővezetési útban keletkező mechanikai változások (tipikusan az 1 ms karakterisztikus időállandónál nagyobb időállandóval jellemezhető struktúrák esetében) jól kimutathatóak pusztán a mért nyitófeszültség tranziens alapján is, mint ahogy ezt a 12. ábra szemlélteti.

A mért hűlési tranziensek alapján tehát eldönthető, hogy a lámpatestben az egyes LED-ek hővezetési útjaiban bekövetkezett-e a hőellenállás drasztikus növekedésével járó elváltozás. Amennyiben ilyen változás gyanúja fennáll, a mért tranziensek utólagos feldolgozásával (struktúrafüggvények "off-line" kiszámítása révén) megállapítható, hogy mely szerkezeti elemekben és milyen jellegű változás következett be. Ennek alapján pontosan megfogalmazható a lámpatestre vonatkozó karbantartási igény: például egy konkrét LED cseréjére lehet szükség, de az is lehetséges, hogy elegendő egy adott LED rögzítő csavarjait meghúzni. Az adatfeldolgozásban azonban nehézséget jelenthet a felhasznált TIM anyag hőellenállásának hőmérsékletfüggése (lásd a 3. ábrán). Ezért célszerű jó minőségű, stabil, kifejezetten LED-es alkalmazásokhoz kifejlesztett termikus határfelületi anyagok használata.

5. Összefoglalás

E cikkben a LED-es közvilágítási lámpatestek lehetséges, a LED-ek hővezetési útjában, termikus tranziens méréssel, felismerhető mechanikai meghibásodásokat tekintettük át. A LED-ekre vonatkozó hosszú távú stabilitási vizsgálatok előzetes eredményei arra utalnak, hogy a hővezetési útban található termikus határfelületek degradációja várható. Amennyiben a degradáció következtében fellépő relatív hőellenállás-változás nagyobb, mint a LED-ek nyitófeszültsége hőmérsékletérzékenységeinek változása, a degradáció teljes bizonyossággal kimutatható. Reális költségfordítással a LED-ek tokozása és az azt hordozó fémmagvas nyomtatott huzalozású lemez közti rögzítés, valamint ezen MCPCB és a lámpatestház közötti rögzítés, illetve a termikus határfelületi anyag megváltozása detektálható. A lámpatest vezérlő és meghajtó elektronikájának alkalmas kialakításával a lámpatestben in-situ termikus tranziens mérések végezhetők. Ezek alapján a hibákat korai fázisban érzékelni lehet és megfelelő karbantartási intézkedéssel megelőzhető a LED-ek működésképtelenné válása.

Köszönetnyilvánítás

A cikk létrejöttét részben az NKTH **TECH_08-A4/2-2008-0168** számú KÖZLED projektje támogatta. Ezúton is köszönetet szeretnénk mondani KÖZLED partnereinknek: a Veszprémi Pannon Egyetem munkatársainak (Schanda János professzor úrnak, valamint Csuti Péternek és Szabó Ferencnek) az LM80 mérésekben való részvétel lehetőségért, az OptimalOptik Kft.-nek a rendelkezésünkre bocsátott LED-mintákért, a HungaroLux Kft.-nek LED-es lámpatestjük CAD modelljéért, valamint a Mentor Graphics MicReD részlegének, különösen Molnár Gábornak és Barna Csabának a méréseink, illetve a CFD szimulációk elvégzésében nyújtott segítségéért.

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt szakmai célkitű-

zéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv **TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002** programja támogatja

Hivatkozások

- [1] Haitz törvénye, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Haitz's_Law
- [2] Roland Haitz, Fred Kish, Jeff Tsao, Jeff Nelson: "The Case for a National Research Program on Semiconductor Lighting", http://lighting.sandia.gov/lightingdocs/hpsnl_long.pdf
- [3] Solid-State Lighting R&D Multi-Year Program Plan FY'09-FY'14, http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_mypp2008_web.pdf
- [4] András Poppe, Gábor Molnár, Tamás 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)*, Santa Clara, USA, 21-25 February 2010, pp. 283-288
- [5] András Poppe and Clemens J. M. Lasance: "On the Standardization of Thermal Characterization of LEDs", In: *Proceedings of the 25th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'09)*, San Jose, USA, 15-19 March 2009, pp. 151-158
- [6] András Poppe, Gábor Farkas, Gábor Molnár, Balázs Katona, Tamás Temesvölgyi, Jimmy-Weikun He: "Emerging standard for thermal testing of power LEDs and its possible implementation", In: *SPIE Proceedings 7784, paper 38* (SPIE Solid State Lighting Conference, 1-5 August 2010, San Diego, USA)
- [7] András Poppe, Gábor Molnár, Péter Csuti, Ferenc Szabó, János Schanda: "Ageing of LEDs: A Comprehensive Study Based on the LM80 Standard and Thermal Transient Measurements", *Proceedings of the 27th CIE Session*. Sun City, Dél-Afrika, 2011.07.10-2011.07.15. PP07. sz. cikk.
- [8] ANSI/IESNA IES-LM-80, "Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources", ISBN 9780879952273 (2009)
- [9] <http://www.mentor.com/products/mechanical/products/flotherm/>
- [10] JEDEC JESD51 standard: "Methodology for the Thermal Measurement of Component Packages (Single Semiconductor Devices)". <http://www.jedec.org/download/search/jesd51.pdf>
- [11] JEDEC JESD51-1 standard: "Integrated Circuit Thermal Measurement Method - Electrical Test Method." <http://www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf>
- [12] Péter Szabó, András Poppe, Márta Rencz: "Studies on the possibilities of in-line die attach characterization of semiconductor devices", In: *Proceedings of the 9th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC'07)*, Singapore, 10-12 December 2007, pp. 779-784.
- [13] Vladimír Székely: "Evaluation of short pulse and short time thermal transient measurements", *Microelectronics Journal*, Vol. 40, No. 9, pp 560-565 (2010). doi:10.1016/j.mejo.2009.12.006
- [14] <http://www.mentor.com/products/mechanical/products/t3ster/>



Marosy Gábor

egyetemi tanársegéd, PhD. hallgató
BME, Elektronikus Eszközök Tanszéke
marosy@eet.bme.hu



Kovács Zoltán

egyetemi tanársegéd, PhD. hallgató
BME, Elektronikus Eszközök Tanszéke
kovacs@eet.bme.hu



Poppe András

egyetemi docens, tanszékvezető helyettes
BME, Elektronikus Eszközök Tanszéke
poppe@eet.bme.hu