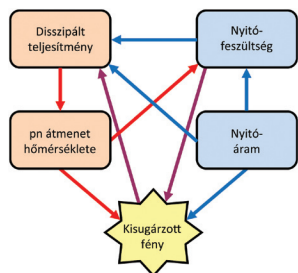


Teljesítmény LED-ek új termikus mérési szabványai

– Poppe András –

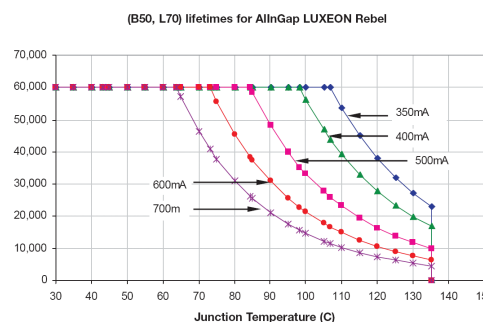
Tartalmi összefoglaló

Egy LED működését meghatározó elektromos, termikus és optikai tulajdonságai szoros összefüggésben vannak egymással (1. ábra), egyik a másik pontos ismerete nélkül nem jellemezhető korrekt módon. A LED-ek megbízhatóságát, élettartamát, valamint üzemi fényáramát alapvetően a LED aktív félvezető lapkájának a hőmérséklete határozza meg (2. ábra). E hőmérséklet pedig a LED lapka aktív felülete és a környezet közötti hőellenállásától függ. Ezen hőellenállás egyik legjelentősebb összetevője magának a LED toknak a hőellenállása, ami a LED-ek fotometriai és egyéb fénytechnikai jellemzői mellett a LED-ek egyik legfontosabb adatlap információját. Sajnos a közelmúltig nem volt semmiféle olyan széles körben elfogadott nemzetközi mérés technikai szabvány vagy ajánlás, amely egyértelmű definíciót adott volna a tokozott teljesítmény LED-ek hőellenállására, illetve annak korrek mérésére vonatkozólag. Jelen cikkben a JEDEC (Solid State Technology Association – korábban Joint Electron Devices Engineering Council) JC15-ös bizottsága által készített és a JEDEC által 2012 áprilisában publikált új, a LED-ek termikus karakterizációjával kapcsolatos szabványokat ismertetjük.



1. ábra: Egy LED fénytechnikai, elektromos és termikus paraméterei szoros összefüggésben vannak egymással és mindegyikre hat a LED lapka hőmérséklete

1. A JEDEC JC-15-ös munkabizottsága félvezető eszközök tokozásának termikus karakterizációjával kapcsolatos szabványokkal foglalkozik. További részletek: www.jedec.org



2. ábra: Lumileds Luxeon Rebel LED-ek várható élettartama a pn-átmenete hőmérséklete és a nyitó áram függvényében. (Forrás: Philips Lumileds, 2007 [1].)

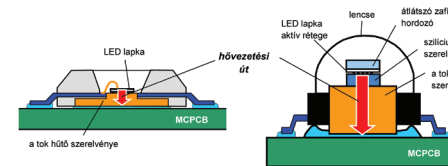
1. Bevezetés

A tokozott teljesítmény LED-ek sok szempontból olyanok, mint minden minden egyéb tokozott, nagy teljesítményű diszkrét félvezető eszköz, amelyeket termikus szempontból legjobban az ún. junction-to-case hőellenállásuk jellemző. Ezen hőellenállás érték nagy pontosságú, jól ismételt mérésére dolgozta ki a JEDEC JC15-ös munkabizottsága¹ az ún. transient dual interface módszerrel alapuló JESD51-14 jelű szabványt [1], amelynek legfontosabb jellemzőit a következőképpen foglalhatjuk össze:

A mérés során feltételezzük, hogy a hőforrás helyétől (teljesítmény félvezető eszköz pn átmenete) a környezetig egyetlen (domináns) úton, kondukción történik a hőátadás. A teljesítmény félvezető tokozása rendelkezik egy olyan hőátadó felülettel, amely felület részét képezi az adott tok „case” felületének. Jellegzetes teljesítmény LED tokok esetére ezt szemlélteti a 3. ábra. További feltételezés, hogy az ilyen tokozású teljesítmény félvezetőt normál működése során ezen felület mentén hűteni kell (pl. alkalmasan méretezett hűtőborda segítségével).

Teljesítmény LED-ek új termikus mérési szabványai

Ezért a mérés során a vizsgált eszközt egy hideg lemezre kell szerelni. A félvezető eszköz kapcsoláskor fellépő hűlési transzienseit kell két különböző termikus határfeltétel esetében felvenni. Az egyik esetben jó termikus kontaktust (kis átmeneti hőellenállású kontaktus), a második esetben rossz (nagy átmeneti hőellenállású) kontaktust kell kialakítani a mérendő tok és a hideg lemez közt. A felületi minőség változása azt eredményezi, hogy a pn átmenet hőmérsékletének hűlési transziensei egy adott ponttól kezdve el fognak térni egymástól. Ugyanezt az eltérést tapasztaljuk az ezen hőmérsékleti transziensekből kiszámított ún. struktúra függvények esetében is. (A struktúra függvény a pn átmenettől a környezetig terjedő hővezetési út hőkapacitás-hőellenállás „térképe”: a pn átmenettől számított teljes hőkapacitást adja meg a teljes hőellenállás függvényében. Alakja függ a hővezetési út egyes szakaszainak geometriai méreteitől és anyagjellemzőitől²).



3. ábra: Klasszikus teljesítmény LED tokok sematikus keresztmetszeti képe. Ezek közös jellemzője, hogy a LED lapkán disszipált hő kondukciónal távozik a lapka aktív felületétől a LED tok hűtőszerelvényének aljág terjedő egyetlen hővezetési út mentén.

A rossz átmeneti hőellenállást a JESD51-14-es szabvány szerint úgy kell realizálni, hogy a mérendő eszközt „szárazon”, azaz termikus határfelületi anyag (TIM – pl. termikus zsír) alkalmazása nélkül szereljük fel a hideg lemezre, míg ha TIM anyagot alkalmazva szereljük fel a mérendő tokot, akkor jó minőségű (kis átmeneti hőellenállású) termikus kontaktust tudunk megvalósítani a hideg

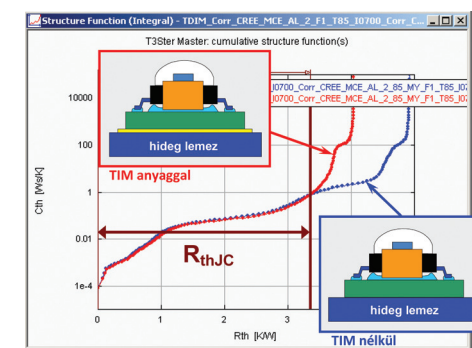
lemez felé. A termikus határfelületig a két fizikai összeállításához tartozó struktúra függvények együtt futnak (hővezetés a tokon belül – azonos a struktúra, ezért azonosak a struktúra függvények vonatkozó szakaszai is), de a határfelületnél, annak különböző minősége miatt a struktúra függvények szétválnak (4. ábra). E szétválási ponthoz tartozó hőellenállás érték adja meg az adott tokozott teljesítmény félvezető eszköz junction-to-case (R_{thJC}) hőellenállás értékét.

2. LED-ek hőellenállása és termikus impedanciája

Egy tokozott félvezető eszköz esetében mindig egy referencia környezetre vonatkozó hőellenállást szokás megadni. Egy X referencia pontra vonatkozóan a hőellenállás klasszikus definíciója a több mint 20 éves JESD51-1-es szabvány [3] szerint a következő:

$$R_{thJ-X} = \frac{T_J - T_X}{P_H} \quad (1)$$

ahol T_J jelöli a félvezető lapka aktív felületének a hőmérsékletét (junction temperature), T_X az X referencia pont hőmérséklete, P_H pedig a félvezető lapka felületén disszipált hőmennyiség, a fűtő teljesítmény.



4. ábra: Egy teljesítmény LED R_{thJC} értékének meghatározása a JESD51-14-es szabvány szerinti módszerrel, az ún. struktúra függvények segítségével.

2. A struktúra függvények formális definícióját többek között a JESD51-14 szabvány [2] A jelű függelék is tartalmazza.

Teljesítmény LED-ek új termikus mérési szabványai

Egy szilícium dióda esetében a disszipációt egyszerűen az eszközön eső feszültség és a rajta átfolyó áram szorzata adja. Tekintettel a mai teljesítmény LED-ek 20..40%-os energiakonverziós hatásfokára, a disszipáció számítása során figyelembe kell venni a kisugárzott fénytelijsítményt is:

$$P_H = I_F \cdot V_F - \Phi_e \quad (2)$$

ahol I_F és V_F rendre a LED nyitóárama és nyitófeszültsége, Φ_e pedig a LED által kibocsájtott fénytelijsítménye (radiometriai fluxusa). A radiometriai fluxus pontos megállapítása nagyon fontos, annál is inkább, mert az erősen függ a hőmérséklettől és a LED nyitóáramától.

A hőellenállás (1) képlet szerinti meghatározásakor a lapka hőmérsékletét közvetve mérjük kihasználva azt a tényt, hogy kényszerített áram mellett egy pn átmenet nyitófeszültsége közel lineárisan függ az átmenet hőmérsékletétől. Egy önnálló kalibrációs méréssel ez a függés megállapítható: az ún. K-faktor kalibráció. E kalibráció eredményét felhasználva a félvezető lapka hőmérsékletváltozását a pn átmenet nyitófeszültség-változásának mérésére vezetjük vissza. A T_x referencia hőmérsékletet egy termopárral mérjük, amelynek hőmérsékletérzékenységét szintén meg kell állapítani. Az (1) képlet szerinti mérésnek tehát az az egyik nagy hátránya, hogy kétféle hőmérséklet érzékelőt használ, amelyeket külön külön kell kalibrálni.

Fejezzük ki a lapka hőmérsékletét az (1) egyenletből két különböző fűtőtelijsítmény esetére:

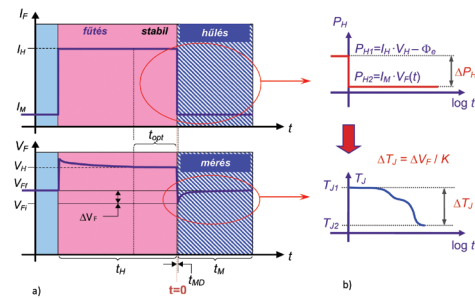
$$T_{J1} = R_{thJ-X} \cdot P_{H1} + T_x \quad (3a)$$

$$T_{J2} = R_{thJ-X} \cdot P_{H2} + T_x \quad (3b)$$

A fenti két egyenletet kivonva egymásból a T_x referencia hőmérséklet kiesik: $\Delta T_J = R_{thJ-X} \cdot \Delta P_H$, azaz

$$R_{thJ-X} = \frac{\Delta T_J}{\Delta P_H} \quad (4)$$

ahol $\Delta T_J = T_{J1} - T_{J2}$ és $\Delta P_H = P_{H1} - P_{H2}$, ahogy azt az 5b. ábra is szemlélteti.



5. ábra: Egy teljesítmény LED termikus tranziens mérése során fellépő a) nyitóáram, nyitófeszültség, illetve b) disszipáció és lapka hőmérséklet hullámformák.

Ennek az eredménynek az értelmezése a következő: A vizsgált LED-re egy nagy, I_H értékű nyitóirányú, ún. fűtő áramot (heating current) kapcsolunk, amely a mai LED-ek esetében tipikusan 350..1500 mA értékű. Amikor ezen üzemi áram mellett a LED eléri stabil üzemi hőmérsékletét, megmérhetjük az általa kibocsájtott fénytelijsítményét. Számunkra most a LED Φ_e teljes radiometriai fluxusa (optikai teljesítménye) az érdekes, amely a CIE 127-2007-es dokumentum [4] ajánlásai szerint pl. egy integráló gömb segítségével mérhető. A nyitóáram (I_H) és az ezen nyitóáram mellett mérhető nyitófeszültség (V_H) és a Φ_e radiometriai fluxus ismeretében megállapítható a P_H fűtőtelijsítmény, amely a LED pn átmenetét T_{J1} hőmérsékletre melegítette. A LED áramát ekkor hirtelen (néhány mikroszekundum alatt) egy kis értékű (pl. 10 mA) ún. mérő áramra kapcsoljuk. Az ekkor fellépő disszipáció értéke P_{H2} , amelynek számítása során az ezen kis áram mellett történő fénytelijsítmény elhanyagoljuk. Ezen alacsony, szinte 0 disszipáció mellett a LED elkezd lehűlni, kellően hosszú idő után a pn átmenet hő-

Teljesítmény LED-ek új termikus mérési szabványai

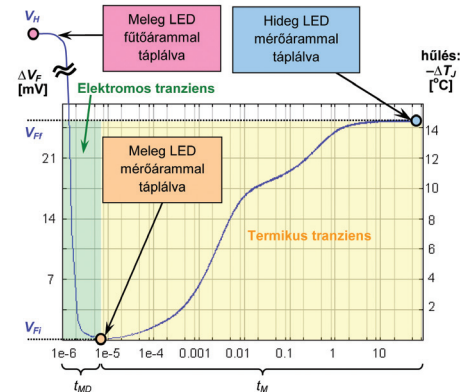
mérséklete T_{J2} értéken stabilizálódik. A mérendő LED-et hideg lemezre szerelve ez a hűlési idő (t_M -mel jelölve az 5. és 6. ábrán) tipikusan 30..120 sec. Az így mért pn átmenet hőmérsékleti tranzienszt a fűtőtelijsítmény változásával elosztva a LED ún. termikus impedancia görbéjét kapjuk:

$$Z_{th}(t) = \frac{\Delta T_J(t)}{\Delta P_H} \quad (5)$$

A hőellenállás tehát nem más, mint egy ilyen termikus tranziens mérésekből származó Z_{th} görbe állandósult állapotbeli értéke:

$$R_{thJ-X} = \frac{T_J(0) - T_J(\infty)}{P_{H1} - P_{H2}} \quad (6)$$

A gyakorlatban $P_{H2} \approx 0$, ezért $T_J(\infty) = T_x$, azaz a (6)-os összefüggésből visszacapjuk a hőellenállás klasszikus, (1) képlet szerinti definícióját.



6. ábra: Nyitófeszültség és lapka hőmérséklet tranziensek.

Az 5. ábra szerinti tranziens folyamatokat kinagyítva, logaritmikusan időléptékben szemlélteti a 6. ábra. Az I_H fűtő áramot hirtelen a kis értékű I_M mérőáramra kapcsolva a nyitófeszültség a V_H értékről a V_{Fi} értékre esik – ez az érték a hűlési folyamat elején tapasztalható kezdeti (intial) nyitófeszültség érték. A LED pn átmenetének elektromos kapacitása (diffúziós kapacitás) miatt véges időt vesz igénybe az új munkapont

elérése. Ezen t_{MD} idő alatt (measurement delay time) a LED-ben egy elektromos tranziens zajlik (diffúziós töltés kúritése), így „késletetni kell” a termikus tranziens mérést, azaz el kell dobni az ezen időintervallumba eső adatpontokat, mert azok az elektromos munkapont hirtelen megváltozásához tartoznak és nem a LED hűlési folyamatára jellemzőek. A mérendő LED elektromos munkapontja a konstans I_M mérő áram mellett is folyamatosan változik, de ez a változás a pn átmenet hőmérsékletének csökkenése miatt fellépő, összesen kb. 50..200 mV értékű nyitófeszültségváltozás miatt van. Miniket pontosan ez a változás érdekel: a nyitófeszültség időbeli változása egyenesen arányos a pn átmenet hőmérsékletének megváltozásával. A mérést t_M ideig addig folytatjuk, amíg a nyitófeszültség el nem éri a V_{Fi} végső értékét. Ekkor a pn átmenet teljes hőmérséklet változása $\Delta T_J = (V_{Fi} - V_H) / K$ lesz.

3. Új szabványok

Amint korábban rámutattunk, a teljesítmény LED-ek termikus karakterizációja során különös fontossággal bír a kisugárzott fénytelijsítmény figyelembe vétele a LED-ek valós hőellenállásának meghatározásakor. Az emittált optikai teljesítmény elhanyagolásával ugyanis látszólag kisebb hőellenállás adódik – ilyen értékek adatlapokon való közzétételével a végfelhasználókat könnyű félrevezetni. Ezt felismerve a JEDEC JC15-ös munkabizottsága 2008-ban létrehozott egy LED munkabizottságot annak érdekében, hogy a LED-ek termikus karakterizációjára vonatkozó új szabványokat dolgozzon ki. E munka eredményeképpen 2012. áprilisában négy új szabványt publikált a JEDEC. Ezek a következők:

- JESD51-50: Áttekintő dokumentum a LED-ek termikus karakterizációjának különböző aspektusairól [5]. E dokumentum a klasszikus félvezetők termikus méréseit áttekintő JESD51-es dokumentum mintájának megfelelően készült.

Teljesítmény LED-ek új termikus mérési szabványai

- JESD51-51: A klasszikus JESD51-es szabvány kiterjesztése teljesítmény LED-ek valós hőellenállásának a mérésére [6].
- JESD51-52: Iránymutatás arra vonatkozólag, hogy a CIE 127-2007-es dokumentum szerinti teljes fluxus méréseket hogy célszerű a LED-ek termikus mérésével kombinálni [7].
- JESD51-53: A fenti JESD51-50 .. 51-52 jelű dokumentumokban használt fogalmak és szimbólumok gyűjteménye [8].

Ezen új szabványok lényege, hogy a meglévő mérési szabványokhoz (JEDEC JESD51-1, 51-14; illetve CIE 127-2007) fogalmaz meg olyan kiegészítéseket, amelyek alkalmazásával a teljesítmény LED-ek termikus mérései korrekt módon elvégezhetőek. Ezen kiegészítések a következők:

- Teljesítmény LED tokok termikus jellemzésére az R_{thJC} junction-to-case hőellenállás érték ajánlott, amelyet lehetőség szerint a JESD51-14-es szabvány szerint célszerű mérni.
- Összhangban a JESD51-14-es szabvány előírásaival a teljesítmény LED-eket hideg lemezre szerelve kell mérni.
- Tekintettel arra, hogy a LED-ek energiakonverziós hatásfoka erős hőmérsékletfüggést mutat, olyan termikus mérési módszer javasolt, amelynek során ez a jelenség nem befolyásolja számottevően a mérési eredményeket. Éppen ezért a LED-ek termikus minősítése során a hűlési tranzienst mérését javasolja a JESD51-51-es szabvány. A hűlési tranzienst felvételére a JESD51-es szabványban szereplő ún. statikus mérési módszer használatát preferálja az új szabvány.
- A fűtő teljesítmény számításakor figyelembe kell venni a LED által kibocsátott optikai teljesítményt (lásd a (2)-es képletet). Ezt a CIE 127-2007-es ajánlása sze-

rinti teljes fluxus mérő összeállításban kell mérni oly módon, hogy a mérendő LED ugyanarra a hideg lemezre legyen szerelve, mint amelyen a termikus mérés során volt és a két mérés között a „LED – hideg lemez” szerelvény mechanikailag ne változzon. A teljes fluxus mérést ugyanazon a hőmérsékleten kell elvégezni, mint a termikus mérést. Ezáltal biztosítható a mért fénytechnikai jellemzők (a teljes emittált optikai teljesítményen túl pl. a fényáram, színkoordináták, stb.) és a termikus jellemzők közötti konzisztencia.

- Javasolt a termikus és radiometriai/fotometriai jellemzők mérését egy közös, kombinált mérési összeállításban elvégezni.
- A mérési eredmények között a valós hőellenállás mellett meg kell adni a referencia hőmérsékletet, a valós hőellenállás, a referencia hőmérséklet és a tényleges disszipáció alapján számított lapka hőmérsékletet (TJ), a mért optikai teljesítményt, az energiakonverziós hatásfokot és javasolt megadni a fénytechnikai jellemzők hőmérsékletfüggését is.

A JESD51-51 és 51-52 jelű szabványok DC táplálású LED-ekre vonatkoznak. A közvetlen AC táplálású LED-ek sajátos mérés technikai problémákat vetnek fel [9]. E kérdésekkel mind a JEDEC, mind a CIE releváns munkabizottságai (JEDEC JCI5, CIE TC 2-76) jelenleg is aktívan foglalkoznak.

4. A mérés folyamata

Az új LED termikus mérési szabványok szerinti mérési folyamatot szemlélteti a 7. ábra. A javasolt mérési összeállítás egy a JESD51-1 szabványban definiált statikus

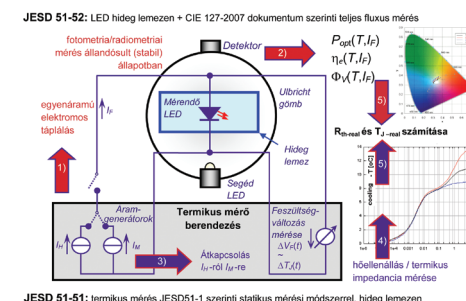
Teljesítmény LED-ek új termikus mérési szabványai

Gyakorlati megvalósítás

A termikus mérőberendezésnek és a hideg lemeznek illeszkednie kell a mérendő LED paramétereire. Ma már nem ritka, hogy egy LED tokon belül több elemi LED chip van sorba kapcsolva, ezért a LED tok kapcsain mérhető nyitófeszültség akár a 100 .. 150 V nagyságrendjébe is eshet. E probléma áthidalására a termikus mérőrendszerek jellemzően ún. booster egységet is tartalmaznak, amellyel az alap mérő berendezés működési tartománya kiterjeszhető. (Továbbra is biztosítani kell azt, hogy 150 V nyitófeszültség mellett pl. 1,5 A-es áramszintről 10 mA-re tudjunk hirtelen, néhány mikroszekundum alatt átkapcsolni.) A hideg lemez is „lépést kell tartson” a mérendő LED-ekkel: alkalmas kell legyen arra, hogy nagyobb disszipált hőmennyiséget (akár 50 W-ot is) elvezessen – lásd a 8. ábrát.

Ilyen mérési összeállítástfejlesztett ki a BME, a Pannon Egyetem, az egykori MicReD Kft. és a TENZI Kft. által alkotott konzorcium az NKTH által 2003 és 2005 között finanszírozott TERALED projektben. A kifejlesztett, szintén TeraLED® védjegyű műszert a Mentor Graphics MicReD részlege jelenleg is forgalmazza, 2005 óta a világ több mint 50 vezető LED gyártójához és LED fejlesztésekkel foglalkozó kutató laboratóriumába elkerült ez a mérési összeállítás. Az új, JESD51-51 szabványnak megfelelő termikus tranzienst mérést a T3Ster® műszerrel, a JESD51-52-es szabványnak megfelelő mérést a TeraLED® berendezéssel hajthatjuk végre. A T3Ster és TeraLED berendezésekből álló kombinált mérőrendszer vezérlő szoftvere lehetővé teszi, hogy mind a termikus, mind a fénytani jellemzőket több nyitóáram és hőmérséklet érték mellett automatikusan megmérjük. Ezáltal lehetőség van arra, hogy a termikus jellemzők mellett a LED-ek fénytani jellemzői hőmérsékletfüggését is megmérjük.

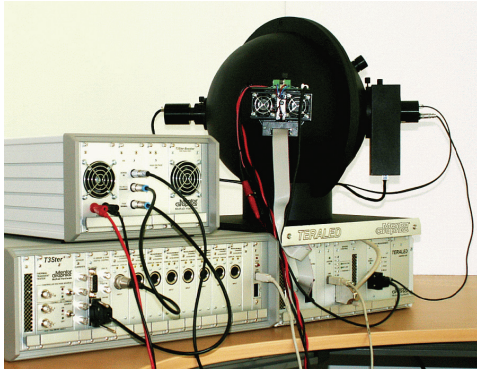
mérési módszert megvalósító termikus mérőberendezés és egy, a CIE 127-2007-es dokumentum ajánlásának megfelelő teljes fluxus mérésére alkalmas berendezés, tipikusan egy alkalmas detektor rendszerrel felszerelt integráló gömb (Ulbricht gömb) kombinációja. A méréshez szükséges DC táplálást a termikus mérőberendezés áramgenerátorai biztosítják. A mérendő LED-et egy, az integráló gömb oldalfalához illeszkedő, állítható hőmérsékletű hideg lemezre szereljük³. A hideg lemezre egy adott hőmérsékletre állítva bekapcsoljuk az I_H fűtő áramot (1). A LED stabil, meleg állapotában megmérjük fénytechnikai jellemzőit – így az emittált optikai teljesítményt is (2). A radiometriai/fotometriai mérést befejezve a LED nyitóáramát ugrásszerűen az I_M mérőáramra kapcsoljuk (3) és valós időben elkezdjük mérni a LED pn átmenetének hűlési tranzienst (4). A hűlési tranzienstől ismert lapkahőmérséklet-változás, valamint az emittált optikai teljesítményt is figyelembe vevő disszipáció alapján meghatározzuk a LED valós hőellenállását, és a hideg lemez hőmérsékletéhez hozzáadva a lapkahőmérséklet megváltozását kiszámítjuk a meleg pn átmenet hőmérsékletét is (5).



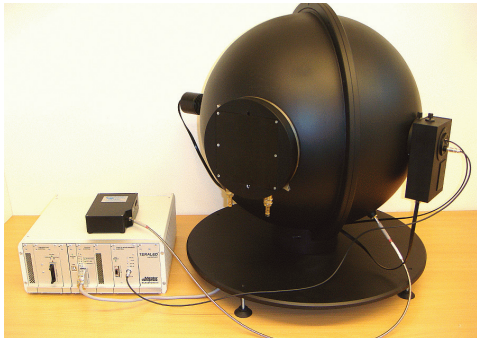
7. ábra: Teljesítmény LED-ek JESD51-51 és 51-52 szabványok szerinti kombinált termikus és radiometriai/fotometriai mérésének folyamata.

3. A teljesítmény LED-ek jellemzően 2Pi-nél kisebb térszögben bocsátanak ki fényt, ezért megengedhető, hogy az integráló gömb oldal falán lévő nyílásra legyenek felszerelve.

**Teljesítmény LED-ek új
termikus mérési szabványai**



a)



b)

8. ábra: A JESD51-51 és 51-52 szabványoknak megfelelő kombinált termikus és radiometriai/fotometriai mérési összeállítás: a) Termikus és radiometriai/fotometriai összeállítás max. 10 W disszipációig és 150 V nyitófeszültségig, b) az összeállítás optikai része vízhűtésű hideg lemezzel, max. 50 W disszipációig.