

Válaszok dr. Imre Attila, az MTA doktora bírálataira

Köszönöm dr. Imre Attila, az MTA doktora disszertációmra vonatkozó bírálatát, az abban megfogalmazott kritikai megjegyzéseket, kérdéseket és méltató szavakat. Az alábbiakban röviden reagálok a bírálatban felvetett általános megjegyzésekre, majd a bírálatban feltett konkrét kérdésekre részletesen válaszolok.

"Sajnos az idegen szakszavak használata – nyilvánvalóan szakterületi specialitásként – igen gyakori. Ez sajnálatos, hisz a nagydoktori dolgozatoknak talán az lenne az egyik feladata, hogy a magyar tudományos nyelvet kialakítsák, erősítsék. "

Ami a magyar szakmai nyelv művelését illeti: teljesen egyetértek a Bírálóval. Igyekeztem mindenütt magyar terminológiát használni. Ezek szerint ami nekem "magyarnak" hat, az a félvezetős szakmától távolabb állóknak már nem tűnik annak. Nekem a *"gyűrűs rezgőkör"* esetében a szűkebb szakma által is használt *"ring oszcillátor"* a természetesebb, dolgozatomban mégis a teljesen magyar, első változatot használtam. Egyébként valóban van pár olyan kifejezés, ami angolul maradt (pl. a *design kit*), ami szakmailag távolabbról nézve zavaró lehet. Ahogy a Bíráló is feltételezte, nem éreztem kellő bátorságot ezek magyarítására. Sok olyan összetett szakmai kifejezést is használok, amelynek minden szava idegen eredetű, de ezek mindegyikét a magyar műszaki szaknyelvben már magyarnak tartjuk, pl. *"termikus impedanciák koncentrált paraméteres RC hálózati modelljei"*. Ilyen esetekben számomra visszatetsző lenne egy erőltetett magyarítás, annak ellenére, hogy e példában egyedül csak a *"hálózati"* az igazán magyar szó.

Akadémiai doktori értekezésemén túl is törekszem a magyar terminológia fejlesztésére, ezért is fektettem hangsúlyt magyar nyelvű publikációk készítésére és bíztattam erre tanítványaimat is. E publikációk közül többre hivatkozom is értekezésemben.

"Az ábrák elhelyezésében, hivatkozásában előfordulnak hibák. Ilyen pl. a 19. oldal alján az 1-7. ábra helyett az 1-9. ábrára való hivatkozás, vagy az 1-15. és az 1-14. ábrák esetében a hivatkozási sorrend felcserélése (hamarabb hivatkozik a Szerző az 1.15-re, mint az 1-14-re). Ezen kívül helyenként a távolság egy ábra és a rá történő hivatkozás között túl nagy (egyes esetekben 1-3 oldal is lehet)"

Elnézést kérek ezekért a hibákért, kellemetlenségekért. A magyarázat prózai: a dolgozat több menetben készült, két különböző számítógépen, ugyanazon szövegszerkesztő egymással nem teljesen kompatibilis változataival (magyar, angol verziók). Ennek révén egyes ábrahivatkozások nem szabályos keresztreferenciák voltak, így fordulhatott elő (a dolgozat többszöri rövidítése után) az 1-7-es ábrára való téves hivatkozás is. A hivatkozások és a hivatkozott ábrák közötti esetleges nagyobb távolságok (ahogy a hibás hivatkozások többsége is) már a dolgozat "tömörítésének" a következményei, több esetben is a dolgozat végső változatában két hasonló ábra közül csak az egyiket tartottam meg, illetve volt olyan eset is, hogy egy ábra később került bele a dolgozatba. Így fordulhatott az is elő, hogy előbb hivatkoztam az 1-15. ábrára, mint az 1-14-esre.

"A téziszfüzet terjedelmében is, formailag is inkább egy rövid értekezéshez hasonlít. Az ajánlott hossz a téziszfüzetre 8-10 oldal, míg ez jelen esetben 26; csak a szöveges részt tekintve is 19 oldal lett."

Valóban, a téziszfüzet a szokásosnál terjedelmesebbre sikerült, részben a kapcsolódó számos referencia, részben a szemléltetésre használt számos ábra miatt. Ezek számát lehetett volna csökkenteni, de érzésem szerint ez az érthetőség rovására ment volna.

A konkrét kérdésekre vonatkozó válaszaim a következők:

- 1. Ha a vizsgált áramköri elem gyorsan melegszik fel (ami egy impulzus-jel hatására gyakori lehet), a klasszikus Fourier-hővezetés rosszul írja le a környezet (pl. lapka hátulja) melegedésének kezdeti szakaszát. Okozhat-e valós rendszerekben veszélyes mértékű túlmelegedést ez a hiba? Ha igen, akkor tervezi-e a Szerző fejlettebb hővezetési modellek használatát (pl. Guyer-Krumhansl modellt)?**

Valóban, kis mérettartományokban és nagyon rövid karakterisztikus idők tekintetében a hővezetés Fourier-féle egyenlete nem jól írja le a valós transzport folyamatokat. A helyzet hasonló a töltéstranszport esetéhez (drift-diffúziós modell). Akkor, amikor nem beszélhetünk kontinuum sokaságról, és a karakterisztikus méretek

már összevethetőek a vizsgált (kvázi)részecskék szabad úthosszával, értelmüket veszítik makroszkopikus fogalmaink, mint pl. a hővezetőképesség, ill. a fajlagos hőkapacitás, és a hőmérséklet sem igazán értelmezhető fogalom többé [1].

Töltéshordozók esetében már a szubmikronos mérettartományban megkérdőjeleződik a kontinuum sokaság feltételezése, de ez a hőterjedés kapcsán még elfogadható volt. [1] szerint a klasszikus drift-diffúziós modellek (mint amilyen a hővezetés Fourier-egyenlete is) a 10-50 nm-es mérettartományban, illetve alatta érvényüket veszítik. Helyettük pl. kvantumfizikai alapokon nyugvó Monte Carlo jellegű szimulációs módszereket alkalmaznak, ezek egy része pl. a részecske dinamika elvén alapuló módszer, vagy egyéb szimulációs módszer, mint pl. a Bíráló által is felvetett Guyer-Krumhansl modell. A téma irodalma túl tág ahhoz, hogy egy ilyen válaszban részletesen áttekintsem. Az eddig említett modelleken túl az ún. "dual-phase-lag" (DPL) modellre utalnék [2], [3]. [3] szerint pl. a disszipáció bekapcsolása után kb. 200 ps-mal a Fourier-módszerrel számított hőmérsékleti tranziens és a DPL modell által számított tranziens közötti különbség csupán 10% körüli (a Fourier-modell túlbecsli a hőmérséklet-emelkedést), kisebb időtávban ez a különbség nagyobb.

A problémák nagyon kis időtávban (ahogy azt a Bíráló kérdése is felveti) és a tényleges hőforrásokhoz nagyon közel jelentkeznek, de az IC lapkák hátoldalán, a hőforrásoktól 50..300 μm távolságban már nem. A termikus határfelületeken keresztül történő hőátadást is kielégítően le lehet írni a felületi érintkezési hőellenállással (*interface thermal resistance*), amelynek értéke pl. a lapkát rögzítő réteg (*die attach layer*) effektív hővezetőképességébe integrálható, szükségtelenné téve tehát a határfelületre vonatkozó fejlettebb hőtranszfer modell használatát makroszkopikus problémák vizsgálata során.

Az analóg integrált áramkörök elektro-termikus szimulációja, illetve a digitális IC-k logi-termikus szimulációja hatékonysága kapcsán fontos, hogy mind a funkcionális viselkedés, mind a termikus viselkedés modellezése és szimulációja egyenszilárdságú legyen, az alkalmazott termikus modell részletessége, érvényességi tartománya és pontossága feleljen meg a funkcionális modell absztrakciós szintjének.

Analóg áramkörök esetében nem tanácsos az adott IC gyártástechnológia minimális csíkszélességének megfelelő méretekkel tervezni: szokásos eljárás a minimális csíkszélesség többszörösének megfelelő geometriai méretek alkalmazása. Továbbá a (ma az 5-10 nm-es minimális csíkszélességgel jellemezhető) legfejlettebb gyártástechnológiákat tipikusan digitális áramkörök előállítására használják (memórák, processzorok). Ezért analóg esetben a tranzisztorok mérettartománya többnyire abban a nagyságrendben található, ahol már nem kritikus az, hogy a Fourier-egyenlet a nano-hőtranszport leírására nem alkalmas. Ugyancsak megjegyzendő, hogy ha a tranzisztorok viselkedését koncentrált paraméteres áramköri modellekkel írjuk le, amely modelleknek kontinuum szemléletet tükröző paraméterei vannak (adalekkekonzentrációk, mozgékonyág), absztrakciós szintben adekvát a klasszikus, a Fourier-féle hőtranszport modellen alapuló termikus szimulátorok használata.

Logi-termikus szimuláció esetében is elmondható, hogy egy standard cella mérete (még a mai legfejlettebb digitális IC gyártástechnológiák esetében is) eléri azt a határt, amelytől kezdve a hőtranszport klasszikus módon leírható. Ebben az esetben is, amikor az elektromos viselkedés modellje magas absztrakciós szinten van (pl. egy kapukimenet állapota 0, 1 vagy X), nem indokolt a funkcionális-termikus együttes szimuláció során a nanométeres mérettartományban is érvényes termikus szimulációs módszerek alkalmazása. Magasabb absztrakciós szintek esetében az időskálán is törekszünk a makroszkopikus termikus időállandók és az órajel ciklusok hossza közötti több nagyságrendnyi különbség áthidalására, így az időzítés szempontjából sem indokolt az ilyen törekvés.

Fontos megjegyezni, hogy gyakori az, hogy az IC lapka termikus modellje nem írja le az IC felületének valós, háromdimenziós topológiáját, mert az ilyen részletességű modell nem adna a végfelhasználó számára jól értékelhető többlet információt. Így az ilyen közelítő geometriát alkalmazó termikus szimulátorok esetében ugyancsak indokolatlan lenne a nano-méretekben történő hőátadás pontos modellezése.

Nagyon sok esetben, és különösen az ún. kompakt termikus modellek megalkotásánál hőmérsékletfüggetlen anyagparamétereket tételezünk fel, ami implicite azt jelenti, hogy a termikus rendszereket lineáris RC rendszereknek tekintjük. Gyakorlati szempontból a Fourier-féle hőtranszport modell érvényességi

tartományának kérdésénél fontosabb annak vizsgálata, hogy a lineáris RC rendszer feltételezésnek mik a korlátai. Rencz Márta és Székely Vladimír kimutatta, hogy ha az elektronikai iparban szokásos anyagok hővezetőképességének hőmérsékletfüggését elhanyagoljuk, az kb. 100 °C-os hőmérsékletemelkedés esetében is csak kb. 3%-nál kisebb hibát eredményez az állandósult állapotbeli eredmények tekintetében [4]. Dirk Schweitzer a problémát a több hőforrásos rendszerek jellemzésére használta, a szuperpozíció elve alapján konstruált termikus karakterizációs mátrixok esetében vizsgálta, kietrjesztve az analízist dinamikus esetre is [5]. E munkában a rövid idejű, nagy amplitudójú gerjesztések esetére egy korrekciós formulát ad Schweitzer, amelynek segítségével a szuperpozíció elve felhasználásával végzett számítások korrigálhatók úgy, hogy a végeredmény a valós, hőmérsékletfüggő anyagparamétereknek megfelelő legyen.

Azzal, hogy a Fourier-módszer felülbecsli hőmérsékletemelkedést, valós rendszerekben hibát nem okozhatunk, legfeljebb pl. a szükségesnél masszívabb hűtőbordát fogunk alkalmazni. Schweitzer publikációja [5] alapján azt mondhatjuk, hogy a linearitás feltételezése a hőmérsékleti csúcsok értékének alulbecslését okozhatja, aminek viszont komoly gyakorlati jelentősége van: lehet, hogy egy félvezető eszköz hűtési megoldását elégtelenre méretezzük. Ennek hatása súlyosabb, mint a nano-hőátvitel hatásának figyelmen kívül hagyása.

A fentiekén túl megjegyzem, hogy mind az elektro-termikus szimulációs rendszerünk, mind a különféle logi-termikus szimulációs keretrendszereink kialakítása olyan, hogy a bennük alkalmazott termikus szimulációs mag könnyen egy tetszőleges másik programra cserélhető. Tehát ha egy gyakorlati probléma vizsgálatakor kiderülne, hogy mégis szükség lenne egy, a nano-méreteken érvényes hőtranszport modellt alkalmazó szimulátorra, az nem nagy erőfeszítéssel bármelyik szimulációs rendszerünkbe beilleszthető.

- 2. A 24. oldalon a Szerző a szimulált és a mért izoterma kép egyezéséről ír (1-21a és b ábrák). Az ábrákon levő hőmérsékleti „szintvonalak” szerint a maximális melegedés 0,48 °C. A modell és a valós eredmények között gyakran 0,15 °C eltérés is van (pl. a szimulációban 0,35 °C, a mérésben 0,192 °C). Ez a teljes skála 30%-a; ezt szerintem nem nevezhetjük jó egyezésnek.**

Az 1-20-as ábra izoterma képei kapcsán tett fenti felvetés teljesen jogos. *“Jó kvalitatív egyezést”* kellett volna írnom. Ilyen kicsi hőmérsékletemelkedést jól mérni egyébként nagyon nehéz volt a folyadékkristályos módszerrel.

Az állandósult állapotra vonatkozó felületi hőmérsékleteloszlás szempontjából legfontosabb, és általában ismeretlen paraméter a félvezető lapkát rögzítő réteg hővezetőképessége és vastagsága. A dolgozatomban is közölt szimulációs eredményeket becsült paraméterekkel kaptuk. 1997 környékén még nem álltak rendelkezésünkre azok a (ma már széles körben ismert és használt) technikák (lásd pl. [6]-ot), amelyekkel pontos paramétereket állapíthattunk volna meg. Így ahhoz képest, hogy becsült értékekkel dolgoztunk és a folyadékkristályos módszerrel mért gradiensek is igen kicsik voltak, a hőmérsékletnövekmények nagyságrendi egyezésével és az izoterma képek alakjának az egyezésével szimulációs módszerünk helyességét igazoltnak véltük.

Megjegyzendő, hogy a termikus szimulációnak máig egy komoly problémája a szimulációs modellekben alkalmazott anyagparaméterek és geometriai méretek pontos meghatározása. E tekintetben – részben a mi 2000-2005 közötti eredményeinkre alapozva – az elmúlt néhány évben születtek olyan megoldások, amelyek kereskedelmi forgalomban kapható termikus szimulátorok esetében automatizálják a részletes, háromdimenziós szimulációs modelleknek a valós fizikai struktúrához való illesztését [6].

Az izotermakép önmagában nem feltétlenül elégséges a szimulációs algoritmus értékelésére; sokkal informatívabb az, hogy egy adott áramkör elektro-termikus szempontból releváns szimulált karakterisztikái megfelelnek-e a méréseknek (1-22. ábra, 1-26. ábra, 1-28. ábra). A mikrotermosztát példában is (1-22. ábra), ha a tényleges, fizikailag megvalósított hővezetési út részleteit pontosabban ismertük volna, a törésponti hőmérsékleteket is pontosabban visszaadta volna az elektro-termikus szimulációval felvett transzfer karakterisztika.

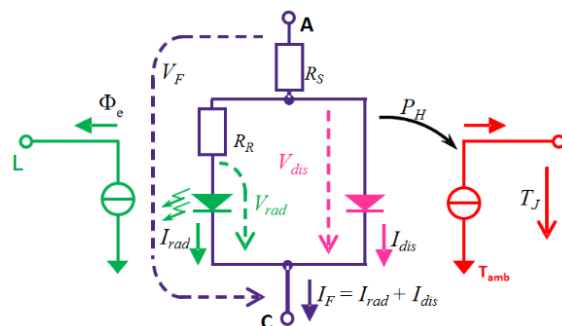
Az ilyen szimulációknak a korai tervezési fázisban van különös jelentősége, amikor viszont a fizikai megvalósítás részletei nem ismertek. Tehát ha az elektro-termikus vagy logi-termikus szimuláció eredménye az áramkör működését lényegesen befolyásoló termikus hatásokra utal, az a cél szempontjából elégséges: a szimulációs modellekkel egy áramkör fizikai megvalósítására vonatkozó elképzelések gyakorlati szempontból releváns gyenge pontjai megállapíthatók. E problémák sok esetben architektúrális módosításokkal kezelhetők, így fontos az, hogy a tervezési folyamat korai fázisában is végezhesünk funkcionális-termikus együttes szimulációt (elektro-termikus vagy logi-termikus szimulációt).

Megjegyzem, hogy az 1. tézis kapcsán bemutatott szimulációs mintapéldák elkészítése és értékelése megfelelt a valós áramkörtervezői munkafolyamatnak: egy adott kapcsolási rajzhoz tartozó layout tervek alapján végeztünk szimulációkat. Ezen layout tervek szerinti áramköröket később legyártattuk, majd a kész IC-k tokozott példányain végeztünk ellenőrző méréseket. Értelemszerűen a szimulációk során a tokozás vonatkozásában csak durva, becsült paraméterekkel kialakított termikus szimulációs modellekkel tudtunk számolni. Ez szerintem kellően indokolja a szimulációval és a méréssel kapott izoterma képek közötti különbségeket.

3. A 79. oldalon levő 4-10 ábra alapján a Szerző azt írja, hogy bár más kutatások hőmérséklet-független idealitási faktort tételeztek fel, az ő eredményeik enyhe hőmérsékletfüggést mutattak. A mutatott függés tényleg enyhe; figyelembe véve, hogy az „ m ” értékeket a 4-9. ábrán bemutatott, illetve ahhoz hasonló mérésekből illesztéssel határozták meg és a 4-9-es ábrán jól látható, hogy a mérési pontok kis mértékben, de szisztematikusan eltérnek az illesztett görbétől, jó lett volna az „ m ” értékeknél a mérésekből/meghatározásból fakadó hibát is feltüntetni. Így jobban látható lenne, hogy az enyhe hőmérsékletfüggés valóban létezik-e.

A Bíráló felvetése jogos, annál is inkább, mert az m idealitási faktor értéke nagyban befolyásolja az I_0 együttható értékét. A 4-10-es ábrán feltüntetett trend az általam követett paraméter-meghatározási sorrendből adódott, minden utólagos művi beavatkozás nélkül. E szerint a Shockley-modellnek a mért dióda-karakterisztikák soros ellenállástól „megtisztított” változatához való illesztése révén adódtak a 4-10-es ábrán feltüntetett értékek, ezért a kapott m értékeket „valósnak” tekintettem. A 4-9. ábrán bemutatott számított görbéket már az így kapott m és I_0 értékekből, valamint a soros ellenállás értékéből számítottam.

Az, hogy a modellillesztésből származó m és I_0 értékek nem tekinthetők függetlennek, a modellünk és a kapcsolódó paraméter-meghatározási eljárás továbbfejlesztése kapcsán kiderült [7]. Egyrészt módosítottuk a modell topológiát (1. ábra) másrészt változtattunk a paraméterillesztési eljáráson. A módosított topológia lényege az R_R ellenállás beiktatása a radiatív ágba, amely révén figyelembe tudjuk venni az optikai veszteségeket és javul a modell pontossága (lásd a Bíráló 4. kérdését).



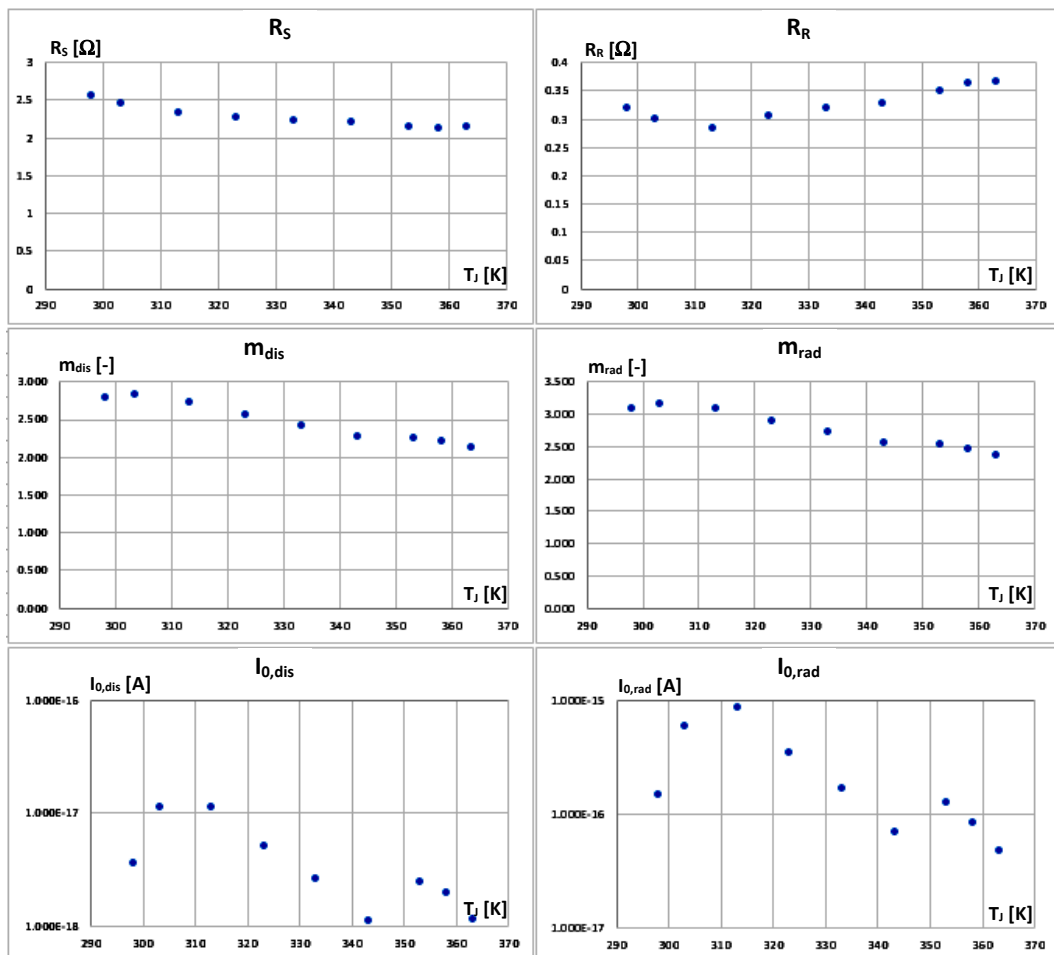
1. ábra: A 4. tézisben megfogalmazott LED modell továbbfejlesztett változatának topológiája [7].

Ennek értelmében együtt optimalizáljuk R_S értékét és a disszipatív dióda m_{dis} és $I_{0,dis}$ értékét, majd az így kapott soros ellenállás értékkel számított V_{dis} feszültséget feltételezve optimalizáljuk a radiatív ág R_R , m_{rad} és $I_{0,rad}$ értékét. Az ezen optimalizálási lépések során előálló paraméterek hőmérsékletfüggését a 2. ábra mutatja. Ezen az ábrán a disszertációm 4-10-es ábrája szerinti enyhe hőmérsékletfüggést látunk az m értékekre,

ugyanakkor az I_0 értékek esetében semmiféle trendre nem tudunk következtetni. Tekintve, hogy az I_0 értékek hőmérsékletfüggését leíró összefüggésekben m egy exponenciális kifejezésben megjelenik [(68)-as, (69)-es és (70)-es egyenletek dolgozatban], az m -ek pontos értéke nagyon fontos.

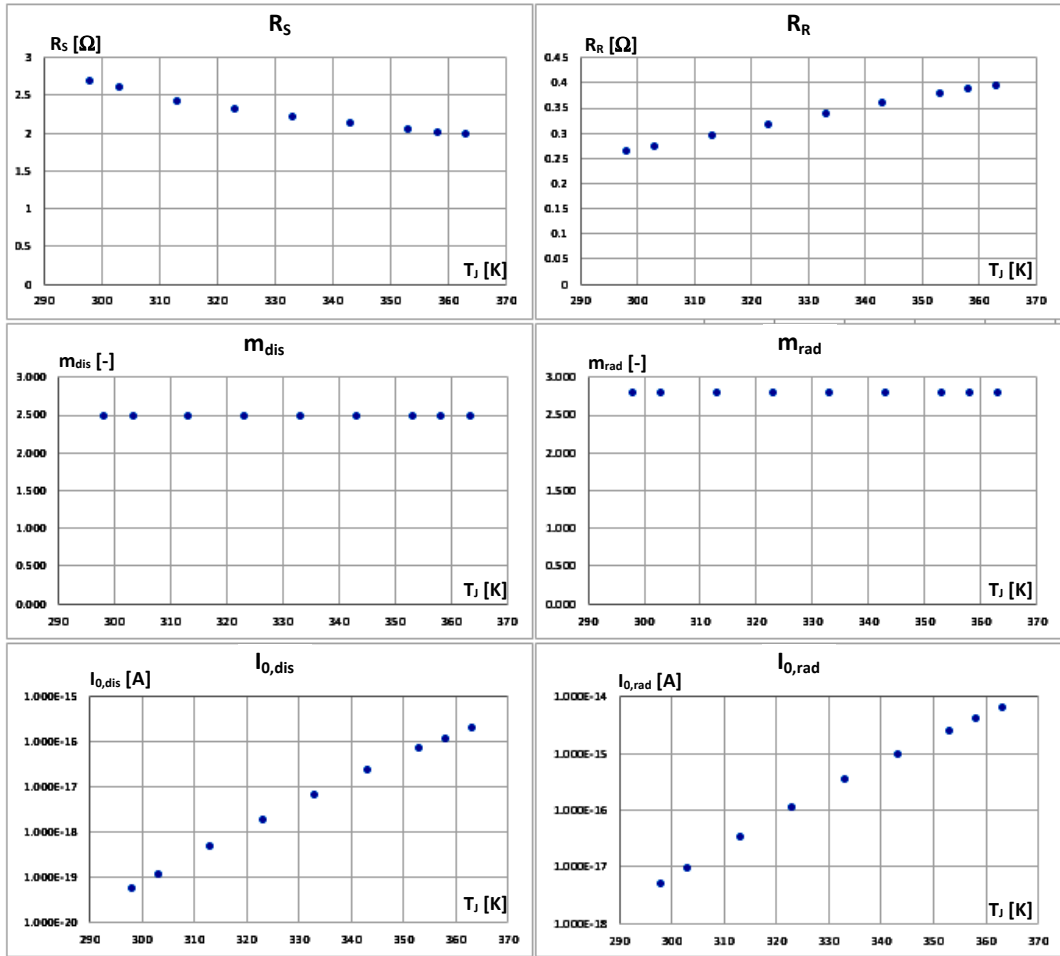
A 2. ábrán az I_0 értékek vonatkozásában látható fluktuáció megszűnik, ha az m értékeket a korábbi optimalizációs lépésben meghatározott értékek átlagaként rögzítjük (3. ábra). Az így adódó I_0 értékek hőmérsékletfüggése már jól leírható a Spice programban szokásos összefüggéssel. Tehát az m értékek vonatkozásában egy "művi" beavatkozás révén az I_0 -kra vonatkozó hőmérsékleti adatsor megfelel a fizikai képnek. A 4. ábrán egy így modellezett LED mért és számított karakterisztikáit [7] mutatom be. Jól látszik, hogy a módosított modell a korábbi modellhez képest tágabb hőmérséklet és nyitóáram tartományban szolgáltat pontos értékeket.

Felmerülhet a kérdés, hogy m függ-e a hőmérséklettől vagy sem? Mivel a LED-ek csúcs-hullámhosszának hőmérsékletfüggése tapasztalati tény (4-13. és 4-14. ábra), ebből következik az effektív tiltotsáv szélesség (W_g) hőmérsékletfüggése is (4-15. ábra), amit szokásosan az ún. Varshni-formulával írják le [(67)-es képlet a dolgozatban].

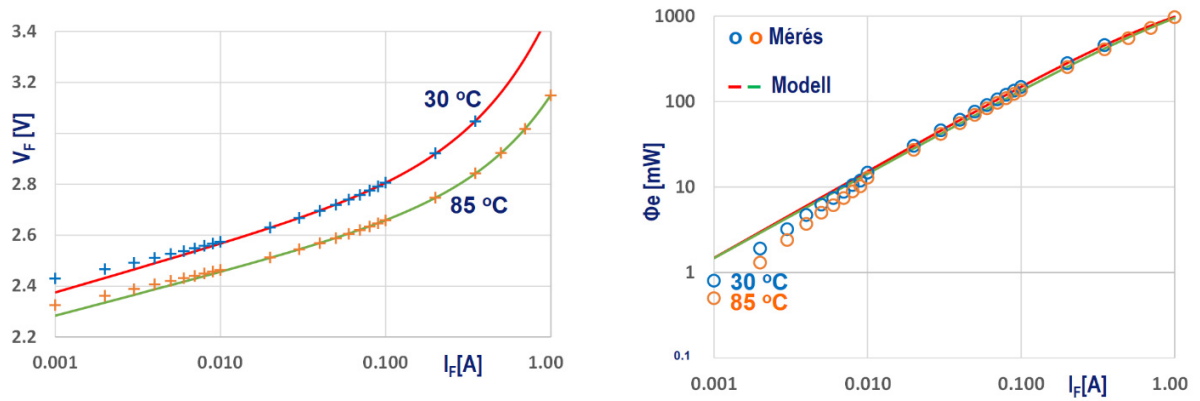


2. ábra: Az 1. ábra szerinti modell paraméterei az első optimalizálási lépések után.

Ez impliciten azt jelenti, hogy a LED-ek aktív zónáját alkotó félvezető struktúrák sávszerkezete változik a hőmérséklettel. Ez a változás megjelenhet az m idealitási tényező hőmérsékletfüggésében, vagy "elrejtett" egyéb modellparaméterek (pl. a beiktatott soros ellenállások, I_0 -k) hőmérsékletfüggésében. Ez tehát modellalkotási és paraméter-meghatározási kérdés. Jelen, továbbfejlesztett modellváltozatunk hőmérsékletfüggetlen m értékekkel működik jól.



3. ábra: Az 1. ábra szerinti modell paramétereit rögzített m értékek mellett.



4. ábra: Az 1. ábra szerinti új modell illeszkedése mérési eredményekhez.

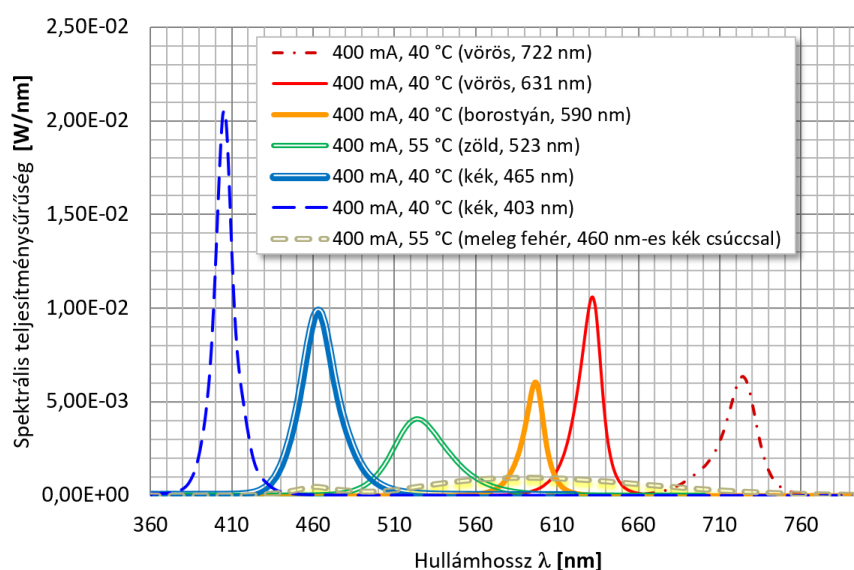
4. A 4-19. ábrán látható, hogy alacsonyabb hőmérsékleten a modell pontossága csökken. Ez jól kivehető már a 40 °C-on mért és modellezett adatoknál is és valószínűleg ez lehet az oka a 25 °C-on mért, nagyobb nyitóáramú adatok hiányának is. Mi lehet a pontatlanság oka? Bár nyilvánvalóan az üzemi hőmérsékletek ezen hőmérsékletek felett vannak, de pl. télen lehülhet-e annyira a LED, hogy ez a pontatlanság probléma lehessen?

A $T_j = 25$ °C-os pn-átmenet hőmérsékletéhez és nagyobb nyitóáramhoz tartozó tapasztalati értékek hiányának mérés technikai oka van. Nagy nyitóáramok mellett a disszipáció következtében fellépő hőmérsékletemelkedés olyan mértékű, hogy azt már nem tudjuk kompenzálni a Peltier-elemes hűtésű hideglemez hőmérsékletének további csökkentésével, mert az optikai mérőrendszer integráló gömbjéhez csatlakozó hideglemez hőmérséklete nem vihető a harmatpont alá, ugyanis az esetlegesen kicsapódó vízpára tönkretenné a gömbfal bevonatát. (Hasonlóképpen hiányzanak a magas hőmérsékletű, kisáramú munkapontok is a mérési eredményekből.) Az alacsony hőmérsékletű, nagyáramú mérési pontok hiánya tehát nincs összefüggésben a modell pontosságával.

Sokkal inkább arról van szó, hogy a disszertációban közölt modell túlbecsli a kibocsátott optikai teljesítményt. Ez a túlbecslés alacsonyabb hőmérsékleteken nagyobb mértékű. Ezt a problémát orvosolja a 3. kérdésre adott válasz kapcsán már ismertetett módosított modell (R_R ellenállás beiktatása).

A tényleges és a modellel számított hatásfok görbék (a dolgozatban 1 típus 1 példányára vonatkozó ábra szerepel) jól mutatják a dolgozatban ismertetett modell korlátait. Az esetek többségében a nagyáramú, magas hőmérsékletű munkapontok a kritikusak, de fontos lehet az alacsony hőmérséklet is, ahogy erre a Bíráló utal. A LED-ek téli lehetséges lehűlését az 5. fejezetben nagyon röviden ismertetett hőmérsékletkompenzált konstans fényáramra szabályzást lehetővé tevő modell [8] kapcsán vizsgáltuk. A dolgozatban leírt LED modell alapján megvalósított szabályzással ellátott lámpatest szimulációs és mérési eredményeinek összevetése jó egyezést mutat; a lámpatest teljes fényáramát valóban sikerült +/-1%-on belül tartani -30 °C és +60 °C környezeti hőmérséklet mellett (5-2-es ábra), ehhez a LED modell az adott LED típus esetében alacsony hőmérsékleten is jól kellett működjön (-30 °C-os környezeti hőmérsékletéhez 0 °C körüli pn-átmenet hőmérséklet tartozott).

A 3. és 4. kérdés kapcsán megjegyzendő, hogy ugyan az általam javasolt multi-domain LED modellt széles spektrális tartományban (5. ábra) érvényesnek találtam, de a disszertációban közölt eredmények csak egy-egy LED típus egy-egy példányára vonatkoznak. A Delphi4LED H2020 ECSEL projekt keretében (www.delphi4LED.eu) most folynak olyan mérések, amelyek során több LED típus nagyobb populációja esetében vizsgáljuk a modellparaméterek eloszlását [9].



5. ábra: A modellalkotáshoz használt egyes teszt LED-ek spektrális teljesítményeloszlása

Hivatkozások:

- [1] E. Pop, S. Sinha, K. E. Goodson, "Heat Generation and Transport in Nanometer-Scale Transistors", *Proceedings of the IEEE* **94**(8): 1587-1601 (2006), DOI: 10.1109/JPROC.2006.879794
- [2] D. Y. Tzou, "Unified Field Approach for Heat Conduction from Macro- to Micro-Scales", *J. Heat Transfer* **117**(1): 8-16 (1995), DOI:10.1115/1.2822329
- [3] M. Zubert, T. Raszkowski, A. Samson, M. Janicki, A. Napieralski, "The distributed thermal model of fin field effect transistor", *Microelectronics Reliability* **67**(12): 9–14 (2016) DOI: 10.1016/j.microrel.2016.09.021
- [4] M. Rencz, V. Székely, "Studies on the non/linearity effects in dynamic compact model generation of packages", *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology* 27(1): 124-130 (2004), DOI: 10.1109/TCAPT.2004.825750
- [5] D. Schweitzer, "Thermal Transient Characterization of Semiconductor Devices With Multiple Heat Sources – Fundamentals for a New Thermal Standard", In: *Proceedings of the 19th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'13)*, 25-27 September 2013, Berlin, Germany, pp. 301-304, DOI: 10.1109/THERMINIC.2013.6675248
- [6] B. Blackmore, "Automatic calibration of detailed IC package models", In: *Proceedings of the 32nd IEEE SEMI-THERM Symposium (SEMI-THERM'16)*, 14-17 March 2016, San Jose, USA, pp. 105-112, DOI: 10.1109/SEMI-THERM.2016.7458454 ST 2016
- [7] G. Hantos, J. Hegedüs, M. C. Bein, L. Gaál, G. Farkas, Z. Sárkány, S. Röss, A. Poppe, M. Rencz, "Measurement issues in LED characterization for Delphi4LED style combined electrical-optical-thermal LED modeling", *Proceedings of EPTC'17*, 6-9 December 2017, Singapore, Paper 173, DOI: 10.1109/EPTC.2017.8277493
- [8] J. Hegedüs, G. Hantos, A. Poppe, "Light output stabilisation of LED based streetlighting luminaires by adaptive current control", *Microelectronics Reliability* **79**(12): 448-456. (2017) DOI: 10.1016/j.microrel.2017.06.060
- [9] T. Mérelle, R. Bornoff, G. Onushkin, L. Gaál, G. Farkas, A. Poppe, G. Hantos, J. Sari, A. Di Bucchianico, "Modeling and quantifying LED variability", Accepted to the *2018 LED Professional Symposium (LpS2018)*, 25-27 Bregenz, Austria

Budapest, 2018. június 25.



Poppe András