

Válaszok dr. Nemcsics Ákos, az MTA doktora bírálatára

Köszönöm dr. Nemcsics Ákos, az MTA doktora disszertációmra vonatkozó bírálatát, köszönöm az abban megfogalmazott kérdéseket, kritikai megjegyzéseket és a méltató szavakat is. Az alábbiakban röviden válaszolok a bírálatban felvetett kérdésekre:

"Az 1-25 ábrán egy másik, de ugyancsak CMOS áramkör felületi hő-térképét ill. ennek szimulációját láthatjuk. (Itt sajnálatosan hiányzik a színkód, ill. a szimuláció szintvonalainak az értéke.) Az utóbbi ábrán jelentős hőmérsékleti gradienseket feltételezhetünk. (A kódok hiányában a mértékét sajnos nem tudjuk.)"

Valóban, az 1-25. ábráról nem olvashatók le közvetlenül a szimulált, ill. mért hőmérsékleti gradiensek. Az 1-25a. ábra valójában az 1-14. ábra lényegi részének a megismétlése. Az 1-14. ábra azért készült, hogy illusztrálja azt, hogy az elektro-termikus szimulációs rendszert integráltuk egy ipari IC tervezőrendszerbe, így a tervező a *post-layout* szimulációs eredményeket – akkor (1997) újszerű módon – az IC layout rajzolatával egyidejűleg tekintheti meg. (Az izotermákhoz tartozó hőmérsékletértékek a kurzor mozgatásával voltak lekérdezhetőek, ezért azok a képernyőmásolaton nem látszanak.) Az 1-25b. ábra jelentősége kettős: egyrészt az izoterma kép kvalitatíve jól egyezik a szimulált hőmérsékleteloszlással, másrészt jó látszik rajta az, hogy az IC lapka felületén futó vezetékezés lokálisan egy picit torzítja a képet, ami jó hőszigetelő dielektrikum réteg tetején elhelyezkedő alumínium fémezés jó hővezetőképességének tudható be. A hőmérsékleti skála sajnos valóban hiányzik a hőtérképekről (az eredeti publikációból is kimaradt), de jól megszámlálhatóan összesen 8 szint látható a folyadékkristályos képen: az IC lapka aktív felületnek "alapszintje" (nagy sárga régió) és 7 további szint. A folyadékkristályos hőtérképező rendszer hőmérsékleti felbontása 0,1 °C volt, így 0,8 °C-nál kisebb hőmérsékleti csúcsot láthatunk az ábra jobb alsó sarkában.

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). E tekintetben az eredmények kétség kívül kielégítőek.

Ami a konkrét kérdést illeti: a Si-lapka hátoldalán kialakuló hőmérsékleteloszlás a felületi eloszlásnál sokkal homogénebb, olyan, mintha az aktív oldali hőmérsékleteloszlást egy aluláteresztő szűrőn keresztül tekintenénk. A szilícium jó hővezetőképessége miatt (amelynek a révén erőteljes az oldalirányú hőterjedés is a lapkában) a hátoldalon sokkal kisebb hőmérsékleti gradiens lesz tapasztalható. Egy 5x5x0,3 mm-es lapka közepén egy 1 W-ot disszipáló foltot feltételezve a félvezető lapka két oldalán kialakuló hőmérsékleteloszlást szemlélteti az 1. ábra.

A konkrét hátoldali hőmérsékleteloszlás egyébként egy *félvezető lapka – chip rögzítő réteg – fém szerelő lemez – termikus határfelületi anyagréteg – hűtő szerelvény – izotermikus környezet* konstrukciót feltételezve függ a chip rögzítő réteg hővezetőképességétől is, és a további anyagrétegek paramétereitől is (hővezetőképesség, vastagság).

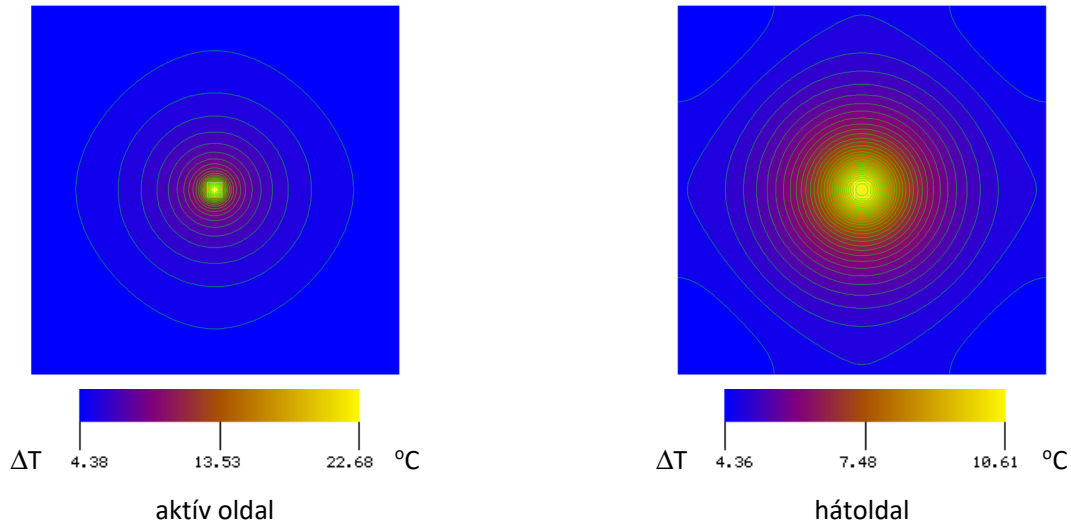
A hátoldali hőmérsékleteloszlás alapján nehéz az aktív oldal pontos hőmérsékleteloszlását közvetlenül megbecsülni. Ha egy meglévő disszipáló alakzat közelében elhelyezünk egy másik, hasonló alakzatot, az aktív oldali hőmérsékleti csúcsok elkülönülnek, míg a hátoldali hőmérsékleteloszláson a két alakzat hatása egybeesődik, ahogy azt a 2. ábra szemlélteti.

"A 2-10. ábra egy tranziens jelenség görbéit mutatja. A grafikonnak sem az x sem az y tengelyén nincsen felirat."

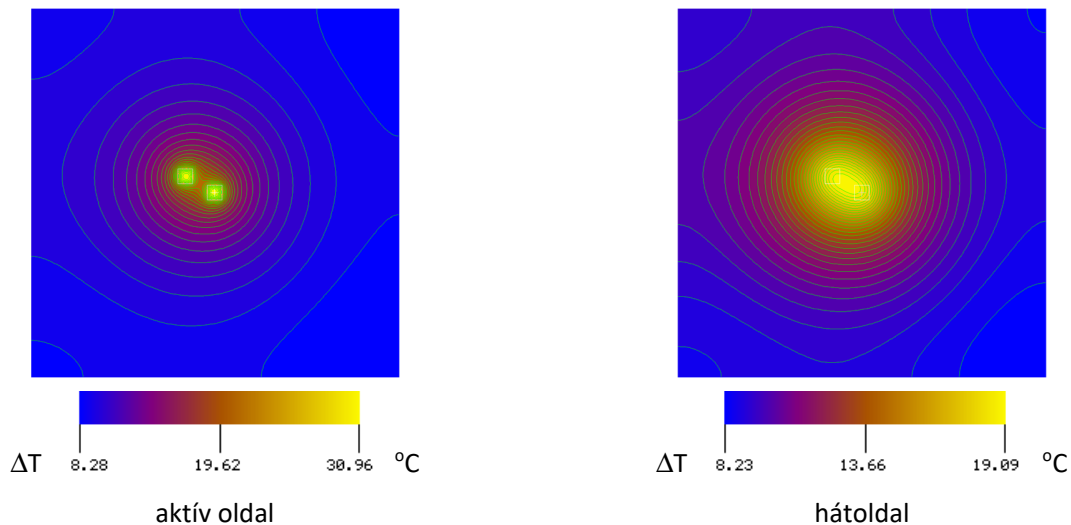
A 2-10-es ábrán valóban tranziens folyamatok látszanak: a vizsgált digitális mintaáramkörben elhelyezkedő kapuk disszipációja következtében fellépő saját melegedésük tranziensei, tehát a vízszintes tengely a s-ban mért t idő, a függőleges tengelyen a °C-ban mért ΔT hőmérsékletváltozás (a környezeti hőmérséklettel megegyező kezdeti lapkahőmérséklethez képesti hőmérsékletemelkedés) szerint van skálázva. Ez az ábra közvetlen szövegkörnyezetéből is egyértelműen kiderül, de az ábrán, valóban csak e mennyiségek jelei szerepelnek, szöveges megnevezésük nélkül – ezért elnézést kérek.

Az is igaz, hogy az ilyen hőmérsékleti tranzienseket általában logaritmikus időskálával szokás ábrázolni akkor, ha az időskála egy dekádnál nagyobb tartományt fog át. Jelen ábra esetében – amelyet Timár András és Rencz Márta

egy folyóirat cikkéből vettem át – az ábrázolt időtartomány csupán 4 másodpercet fog át és célja nem az IC lapka 3D-s termikus környezete helyes modellezésének a demonstrálása volt (azzal, hogy a korai termikus időállandókat jól mutassa), hanem annak szemléltetése, hogy az IC lapka dinamikus termikus karakterizációs mátrixának alkalmas kezelésével a relaxációs módszeren alapuló logi-termikus szimulációs rendszerekben a digitális áramkörök termikus tranzienst viselkedése leírható.



1. ábra: 1 db disszipáló alagzat keltette hőmérsékleteloszlás egy szilícium lapka két oldalán (THERMAN szimuláció)



2. ábra: 2 db disszipáló alagzat keltette hőmérsékleteloszlás egy szilícium lapka két oldalán (THERMAN szimuláció)

"Utalás ugyan történik az órajel frekvenciára, de számolási eredményt nem közöl a szerző. A jelen termikus modellezés hoz-e új eredményt ezen a területen pl. a kritikus alkatrészek tekintetében?"

A logi-termikus szimuláció célja nem valamilyen optimális működési frekvencia meghatározása, hiszen azt egy digitális IC esetében többnyire globális specifikációk rögzítik, az nem szabad tervezési paraméter. Ezért a működési frekvenciával kapcsolatos számításokra csak annyiban van szükség, amennyiben a frekvencia az egyes digitális funkcionális blokkok (pl. kapuk, tárolók) disszipáció modelljeinek bemenő paramétere. A logi-termikus szimulációnak sokkal inkább az a célja, hogy megvizsgáljuk, hogy az adott áramkör egy lehetséges implementációja (architektúra, fizikai layout) helyesen működik-e. A logi-termikus szimuláció a szokásos *post-layout verifikációt* egészíti ki tehát a termikus vonatkozásokkal, pl. annak vizsgálatával, hogy egy kritikus adatút

időzíti viszonyait a helyi lapkahőmérséklet nem befolyásolja-e úgy, hogy az egész áramkör működése összeomlik. Fontos szempont a forró pontok megtalálása is, mert ezek ismeretében pl. egy mikrocsatornás hűtéssel ellátott 3D tokozott rendszerben a mikrocsatornák, illetve a termikus viák ezek közelében helyezhetők el, csökkentve ezzel a forró pontok hőmérsékletét [1], [2], [3].

Az időzíti viszonyok termikus okból történő torzulására vonatkozó mintapéldát a disszertációm valóban nem tartalmaz, de publikációinkban található ilyen is. Például:

- Nagy Gergely et al: Egy kapu szinten adott áramkör időzíti viszonyainak hőmérséklet indukált torzulása (a CellTherm szimulációs rendszerrel szimulálva) [4],
- Jani Lázár, Poppe András: SystemC-AMS modelljével adott PID controller hibajelének hőmérséklet indukálta változása (a LogiTherm keretrendszerrel szimulálva) [5].

"A teljesítmény-LED-ek mérésénél egy új metodikát vezet be a szerző. Az elrendezés sémáját a 3-3, a 3-6 ill a 4-1 ábrán láthatjuk. Az ábrákon a detektorral szemben a segéd-LED helyezkedik el. A 3-4 ábrán az elrendezés fényképe szerepel. Ott a referencia-LED van a detektorral szemben. Melyik a valós elrendezés?"

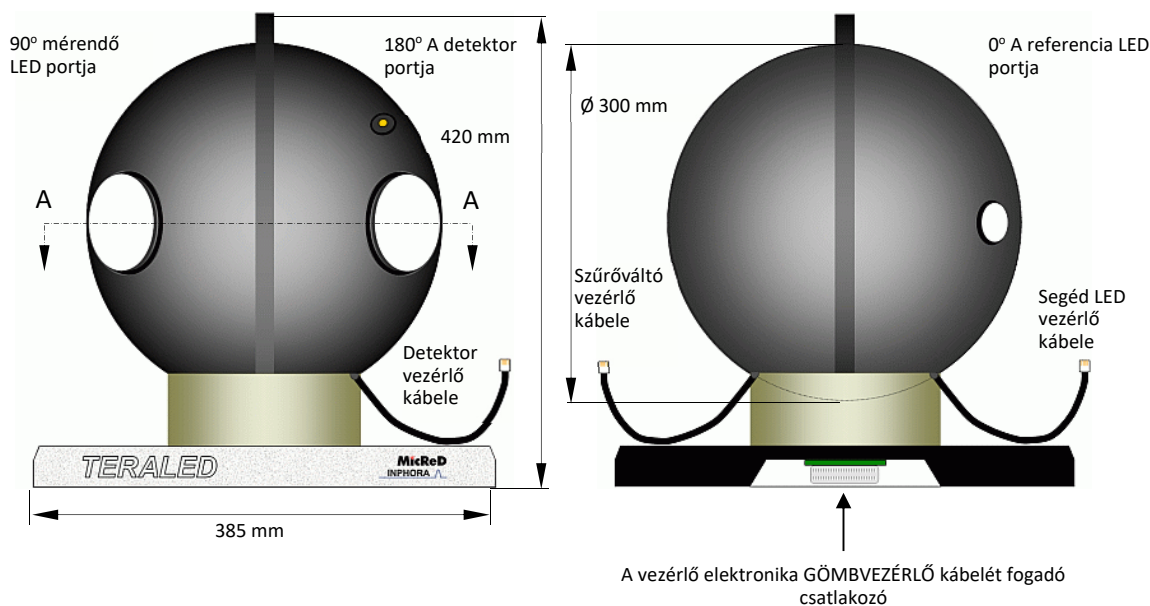
Ami a LED-ek kombinált termikus és radiometriai/fotometriai mérésére szolgáló mérőrendszer tényleges fizikai megvalósítását illeti, a 3-3-as ábra az optikai mérések vonatkozásában nem a tényleges fizikai elrendezést mutatja; ezen ábra célja sokkal inkább a kombinált mérési folyamat szemléltetése. Valós mérési összeállításokban az a hideglemez, amelyre a mérendő LED-et szereljük, az Ulbricht-gömb oldalán kialakított nyíláshoz csatlakozik (ún. 2π geometria) és nem a gömb belsejében található (ellentétben a 3-3-as és a 4-1-es ábra által sugalltakkal). A 4-1-es ábra szintén csak a szemléltetést szolgálja. A tényleges mérési összeállításban a segéd LED és a detektor elhelyezkedése a 3-4-es ábrán bemutatott fénykép szerinti. A 3-6-os ábra a LED-ek optikai mérésére vonatkozó CIE 127:2007-es dokumentum alapján készült és a szigorú helyettesítéses teljes fluxus mérési módszert illusztrálja. Az ezen az ábrán látható árnyékoló lemezek minden Ulbricht-gömbben megtalálhatóak. Ezek célja a segéd fényforrásból, illetve a mérendő fényforrásból a detektorra eső direkt megvilágítás kitakarása. (A segéd LED árnyékolója szerepel az ábrán, de nincs feliratozva.) A TeraLED mérőrendszer Ulbricht-gömbjének tényleges optikai kialakítása a 3. ábrán látható.

"A direkt sugárzás kivédésére egy árnyékolót használ a szerző. A mérendő LED helyzete hogyan befolyásolja a fotometriai értékeket?"

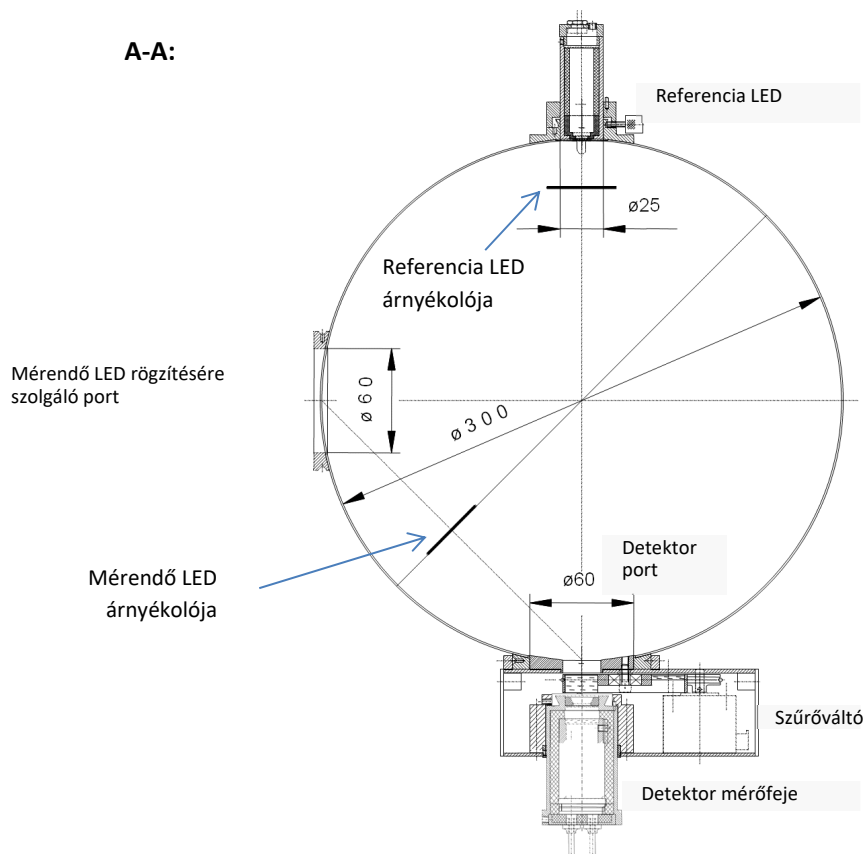
Egy ideális integráló gömbben a mérendő fényforrás helyzete nem szabad, hogy befolyásolja a mért teljes fluxus (pl. teljes fényáram vagy a teljes kisugárzott optikai teljesítmény) értékét; a gömbfal ideális, diffúz visszaverődést okozó bevonata biztosítja azt, hogy a gömbfalon egyenletes megvilágítás alakuljon ki, azaz hogy a detektornyílást is a fényforrás teljes fluxusával arányos megvilágítás érje. Ennek értelmében a detektornyílás a gömb felületén bárhol elhelyezhető, a detektor port és teszt LED port relatív helyzetét lényegében csak gyakorlati szempontok (kábelezés, termikus csatlás minimalizálása, jó kezelhetőség) befolyásolják.

Valós elrendezések az ún. 4π , ill. 2π geometriát követik. Az ún. 4π elrendezést olyan fényforrások esetében alkalmazzák, amelyek szinte a teljes térbe, 4π sr-t megközelítő térszögben sugároznak. Ekkor a fényforrás geometriai középpontja a gömb geometriai középpontjával esik egybe. Ha egy fényforrás (tipikusan a teljesítmény LED-ek) csak a fél térbe vagy még szűkebb nyalábban, azaz 2π sr-nál kisebb térszögben sugároznak, a fényforrás elhelyezhető a gömb falán is. Ilyen LED-ek esetében ennek az az előnye, hogy a mérendő LED-ek termikus stabilitását biztosító hűtőszelvény (pl. Peltier-elemes hideglemez) a gömbön kívül lehet, nem zavarva az optikai méréseket. Ez az elrendezés már eltér az ideális integráló gömbös elrendezéstől. Minden esetben további eltérést jelent az ideális gömbtől a gömbfal reflexiós tényezőjének (reflexiós spektrumának) esetleges egyenetlensége és relatív páratartalom függése, az árnyékolók, a gömbbe benyúló segéd fényforrás, a detektor és maga a mérendő fényforrás, 4π geometria esetében a mérendő fényforrás mechanikai tartó szerkezete is.

A megfelelő etalon fényforrással történő kalibráció szolgál a fentiek mérésre gyakorolt hatásának minimalizálására. A detektor típusától függően (pl. fotométer, radiométer, spektrométer) más és más fénytani mennyiségre hitelesített kalibráló fényforrást kell használni, a kalibráló fényforrás sugárzási karakterisztikája meg kell feleljen a kalibrálandó integráló gömb geometriai elrendezésének (2π , 4π).



A-A:



3. ábra: A TeraLED mérőrendszer 30 cm átmérőjű integráló gömbjének fizikai elrendezése

Ha a CIE 127:2007-es dokumentumban leírt szigorú helyettesítéssel mérést végzünk, akkor a detektor+gömb rendszer kalibrációjára olyan standard LED-et használunk (2π geometriában) amelynek spektrális teljesítményeloszlása a lehető legközelebb van a mérendő LED spektrális teljesítményeloszlásához. Ezzel a mérőrendszer szokásosan f_1 -gyel jelölt ún. spektrális illesztetlenségi hibája csökkenthető. A mérési eredményekre leginkább a szűrő alapú detektorok (fotométer, radiométer, koloriméter) ilyen spektrális illesztetlenségi hibája van hatással. A spektrális illesztetlenségi hiba csökkentésének lehetőségeivel foglalkozik Csuti Péter 2017-ben megvédett PhD disszertációja [6].

Ha spektrométerrel mérjük a fényforrás abszolút spektrális teljesítményeloszlását és a mért spektrumokból származtatjuk a skalár jellegű fotometriai mennyiségeket, akkor a mérést leginkább befolyásoló tényező a spektrométer ún. szórt fény hibája, illetve hullámhossz felbontása és hullámhossz kalibrációjának helyessége. Fontos, hogy a spektrométer bemenetétől szolgáló száloptikás portra se essen direkt megvilágítás.

Hivatkozások:

- [1] G. Nagy, P. Horváth, L. Pohl, A. Poppe, "Advancing the thermal stability of 3D ICs using logi-thermal simulation", *Microelectronics Journal* **46**(12A): 1114-1120 (2015), DOI: 10.1016/j.mejo.2015.06.025
- [2] M. Németh, G. Takács, L. Jani, A. Poppe, "Compact modeling approach for microchannel cooling and its validation", *Microsystems Technologies* **24**(1): 419-431 (2018), DOI: 10.1007/s00542-017-3330-z
- [3] Gy. Bognár, G. Takács, L. Pohl, L. Jani, A. Timár, P. Horváth, M. Németh, A. Poppe, P. G. Szabó, "Integrating Chip-level Microfluidics Cooling into System Level Design of Digital Circuits", In: Proceedings of the 33rd IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'17), 13-17 March 2017, San Jose, USA, pp. 77-87, DOI: 10.1109/SEMI-THERM.2017.7896912
- [4] G. Nagy, A. Timár, A. Szalai, M. Rencz, A. Poppe, "New simulation approaches supporting temperature-aware design of digital ICs", In: Proceedings of the 28th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'12), 18-22 March 2012, San Jose, USA, pp. 313-318. DOI: 10.1109/STHERM.2012.6188866
- [5] L. Jani, A. Poppe, "Framework for thermal-aware verification of digital and mixed signal systems", *Microelectronics Reliability* **79**(12): 499-508 (2017), DOI: 10.1016/j.microrel.2017.03.023
- [6] Csuti Péter, "Világítódiodák fotometriai és színíngermetriai jellemzése", PhD disszertáció, Pannon Egyetem, Veszprém, 2016, DOI: 10.18136/PE.2016.642

Budapest, 2018. június 25.



Poppe András