

Válaszok dr. Kuczmann Miklós, az MTA doktora bírálatára

Köszönöm dr. Kuczmann Miklós, 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.

„A dolgozat formájában olyan, mint egy könyv. Sok helyen túl leírónak gondolom, a részletek bemutatása számomra sok helyen hiányzott, emiatt is fogalmazódott meg oly sok kérdés. A tézisekhez kapcsolódó publikációkat (legalább a fontosabbakat) jó lett volna például függelék formájában a dolgozathoz kapcsolni.”

Egyetértek a Bírálóval: valószínűleg disszertációm stílusában észrevehető a több mint 30 éves oktatói múltam lenyomata. Bizonyos részletek (pl. az áramkörszimuláció konvergencia kérdései), amelyek számomra adottak voltak, hiányoznak, mert azokkal érdemben nem én foglalkoztam. Ezért az egész dolgozatban (figyelemmel a terjedelmi korlátokra is) a saját eredményeim / téziseim kapcsolatos részletek kifejtésére koncentráltam.

Disszertációm 1. fejezetének azon része, amely a szubsztrát N-kapu modelljének előállítását írja le, lényegében az ezzel foglalkozó folyóirat cikkemmel [1] egyezik meg, míg a LED modellezéssel foglalkozó 4. fejezet szintén egy folyóiratcikkem [2] alapján készült – ezen cikkek függelékben való csatolása tehát nem jelentett volna érdemi többlet információt. A MTA doktora pályázatomhoz csatoltam az 5 legjelentősebb publikációmat. Ezek közül az 1. tétel a 4. fejezettel megegyező cikk [2], a 3. és 4. tétel [3], [4] disszertációm 3. fejezetéhez nyújt további információt, az 5. tétel [5] pedig az 1. és 2. fejezethez, ezért nem tartottam szükségesnek egy, a Bíráló által javasolt függelék.

„A dolgozatban többször említett CFD és FEM ma már sokkal gyorsabban futtathatók, sőt multidomain szimulációk is megvalósíthatók. Ezzel kapcsolatban merült fel a kérdés: Van arra lehetőség, hogy a jelenség pontos fizikai és geometriai modellje alapján futtatott szimulációkból nyert eredmények alapján valósítson meg egy egyszerűbb koncentrált paraméterű modellt? Például egy eszközt és környezetét numerikus módszerekkel szimulálva előállna egy szimulációs adathalmaz, és ezen adathalmazra alapozva identifikálna egy koncentrált paraméterű modellt.”

Igen, van ilyen lehetőség: az elektronika termikus modellezése terén egy ilyen módszer (DELPHI módszertan) nemzetközi ipari szabvánnyá is vált. Ezt nagyjából két évtizeddel ezelőtt dolgozták ki IC tokok termikus kompakt modelljeinek előállítására. (A DELPHI projekt eredményeiről a projektvezetők egy kétrészes cikksorozatban számoltak be [6], [7].) Ezzel kapcsolatban a JEDEC a félvezető tokok termikus modellezésével, azon belül kompakt modellek előállításával kapcsolatos szabványsorozatot (JEDEC JESD15-x) adott ki. Ezen szabványok közül a JESD15-4-es dokumentum [8] írja le a DELPHI módszertant.

A DELPHI módszerrel történő kompakt modell generálás kereskedelmi megvalósítására világszerte ismert példa a FloTHERM PACK program [9].

A téziseim kapcsán megfogalmazott konkrét kérdésekre vonatkozó válaszaim a következők:

Az 1. tézissel kapcsolatos kérdések:

1. A szimulátor csatolás nagy hátrányaként említi, hogy konvergenciája kétséges, illetve, konvergencia megoldás esetén annak helyessége kétségbe vonható. A 2. tézisbeli alkalmazása miatt kérem, mutassa be, hogyan lehet ezt a módszert biztos konvergenciára bírni. Hogyan győződhetünk meg a megoldás helyességéről?

Előjáróban pontosítanám a fogalmazást. Általában is elmondható, hogy léteznek olyan gyakorlati áramkörök, amelyek esetében még maga a Newton-Raphson iteráción alapuló nemlineáris áramkörszimuláció konvergenciája sem biztos. Jellegzetes példák: oszcilláló áramkörök, nagyon nagy erősítésű áramkörök. A gyakorlati probléma lényege az, hogy az iteráció során, ha nem alkalmaznak valami alkalmas heurisztikát, előfordulhat az, hogy a megoldó algoritmus az áramkör különböző állapotaihoz tartozó munkapontok környezetei között oszcillál. Broyden [10], illetve Branin és Wang [11] dolgoztak ki alkalmas lépésszabályzó módszereket, amelyekkel a Newton-Raphson iteráció konvergencia tulajdonságai javíthatók. E módszereken alapul a TRANZ-TRAN program lépésszabályzó mechanizmusa is, további heurisztikákat alkalmazva [12]. Még ezen konvergencia tulajdonságokat javító, vagy konvergencia megoldást heurisztikusan keresni próbáló módszerek alkalmazása mellett is előfordulhatnak olyan áramkörök, amelyek egy-egy munkapontját nem lehet pl. egy DC

szimulációban "megfogni". Ilyenkor szimulációs trükkök alkalmazására (pl. egy problémás csomópont és a föld közé beiktatott kvázi végtelen ellenállás) van szükség. Általában is elmondható tehát, hogy még a szokásos nemlineáris áramkör-szimuláció esetében sincs matematikai garancia a konvergenciára.

A Newton-Raphson iteráció lényege, hogy a megoldandó $f(x) = 0$ egyenletrendszer $\partial f_i / \partial x_j$ parciális deriváltak alapján (Jacobi mátrix) számítjuk ki a megoldás következő közelítése felé megteendő Δx lépést. A relaxációs módszer esetében, mivel két, egymástól teljesen független, csak a kimenő és bemenő adataikon keresztül kommunikáló szimulátorral próbálunk eredményre jutni, a teljes elektro-termikus probléma elektro-termikus és termo-elektromos parciális deriváltjait (azaz a $\partial P / \partial U$, illetve $\partial I / \partial T$ jellegű transzfer vezetéseit) nem lehet kiszámítani. Így olyan esetekben, amikor ezen transzfer vezetéseknek szignifikáns szerepük lenne az egymást követő iterációs lépések során az x ismeretlenek terében megteendő Δx lépésvektor meghatározásában, konvergencia problémák adódhatnak. Nem ismerek olyan publikációt, amely olyan eljárást közöl, ami az ilyen problémákon enyhítene.

Digitális IC-k esetében az alapelvük, mint elektromos alkatrészek, erősen nem reciprok módon működnek. Ez azt jelenti, hogy egy kapukimeneten fellépő bármely változás lényegében nincs hatással a kapubemenetekre, így a hőmérsékleti változásoknak sincs közvetlen visszacsatoló hatása a kapuk kimenete és bemenete közt, azaz a fent említett transzfer vezetések értéke lényegében zérus. Ez azt jelenti, hogy a relaxációs módszer kapcsán fent említett probléma az ilyen módon megvalósított logi-termikus szimulációnál nem jelentkezik, így a logi-termikus szimuláció kapcsán nincs szükség arra, hogy a szimulációs rendszert külön „konvergenciára bírjuk”.

Logi-termikus szimuláció esetében felmerül a szimuláció finomságának a kérdése. A "nyers erő" technika az, ha minden egyes órajel ciklus esetében disszipációeloszlást számolunk a kapuk állapotváltozásai alapján (CMOS megvalósítást feltételezve), ezt követi egy termikus szimuláció, majd az így kapott lokális hőmérsékletek alapján frissítjük a kapuk modelljeit és folytatjuk a szimulációt a következő órajel ciklusra. Ezzel tulajdonképpen pl. egy bekapcsolási (melegedési) tranzienszt és annak az időzírtési viszonyokra és a disszipációra gyakorolt hatását tudjuk nyomon követni.

Ennél kevesebb erőforrást igényel az, ha egy digitális áramkör egy jellegzetes működési módjára jellemző, több órajel ciklusra vonatkozó disszipációeloszlás alapján végezzük a logi-termikus szimulációt (pl. egy számláló folyamatosan számlál). Ekkor az áramkör stacionárius állapotára vonatkozó eredményhez jutunk. Ennek helyessége pl. a mért és a szimulációval számított hőmérsékleteloszlások összehasonlításával lehetséges [5]. Pontos eredménynek azt tekinthetjük, ha a forró pontok helyét és hőmérsékletét jól szolgáltatja a szimuláció. (Ez nem csak a szimulációs algoritmus tulajdonságaitól függ, hanem pl. az IC lapka és környezete termikus modelljének pontosságától is, így helyesebb a hőmérsékleti csúcsok nagyságrendbeli egyezéséről beszélni.) Általában is elmondható, hogy a szimulációs eredmények pontossága szempontjából sokkal nagyobb pl. a termikus anyagparaméterek ismeretével kapcsolatos bizonytalanság jelentősége, mint az egyes szimulációs algoritmusok közötti különbségek hatása.

Logi-termikus szimuláció esetében nehéz a "megoldás helyességét" úgy definiálni, mint a tranzisztor szintű elektro-termikus szimulációnál, azaz hogy a szimuláció helyesen számolja-e ki pl. egy áramkör egy adott munkapontját. A forró pontok jellemzésén túl kielégítő eredménynek tekinthető az is, ha a szimuláció feltárja pl. az áramkör időzírtési viszonyainak hőmérsékletérzékenységét, azaz arra utal, hogy pl. egy adott átlagos lapkahőmérséklet felett az időzírtés összeomlik. Itt e tény felderítése maga az eredmény.

2. A szimulátor csatolás nagy futási ideje nem volna csökkenthető koncentrált paraméterű termikus modell segítségével? Vannak/voltak erre kísérletek?

De igen, csökkenthető. A Virginiai Egyetemen Kevin Skadron professzor vezette csoportja által kifejlesztett HotSpot szimulációs rendszer lényegében egy digitális IC nagyobb disszipáló régióihoz a geometria alapján rendel egy-egy RC modellt és az így előállított RC hálózatot oldja meg (lásd pl. [13]-ot), bár a HotSpot eredeti alkalmazásai közt nem ismerek olyat, ahol csatolt problémák szimulációjára használták volna azt, de a logi-termikus szimulációt lehetővé tevő, Jani Lázár doktoranduszom által továbbfejlesztett, legújabb keretrendszerünkben a HotSpot program is használható termikus szimulációra. Eredeti, 1997-es IEEE folyóirat cikkünkben is hasonló megoldást vázoltunk fel [5]: a koncentrált paraméteres termikus modell kezelésére a TRANZ-TRAN programot javasolva.

3. Az az érzésem, hogy a direkt módszernél említett hátrány, nevezetesen, hogy implementációja nehézségekbe ütközik, eltörpül amellet, hogy milyen előnyöket szolgáltat a megoldás során. Mi a tapasztalata/véleménye ezzel kapcsolatban?

Önmagában az implementáció még nem lenne probléma, mint ahogy az irodalomban számos példát találhatunk ilyenekre (többnyire egyetemi háttérrel), bár megjegyzendő, hogy egy áramkör-szimulációs program kifejlesztése komoly

programozói, hálózatalméleti, mátrixalgebrai ismereteket és a numerikus módszerekben való komoly jártasságot igényel. Ma, a széleskörűen hozzáférhető Spice program verziók mellett egyre kevesebb olyan mérnökcsoportot találni, amely ilyen ismeretekkel rendelkezik és belevág ilyen fejlesztésekbe.

A komoly problémát egy elektro-termikus szimulációs szoftverrendszer felhasználói támogatása jelenti. Az 1990-es évek végéről, a 2000-es évek elejéről saját tapasztalatunk is van: TRANZ-TRAN és THERMAN(AL) programokat egy IC tervező rendszer adott IC gyártástechnológiára vonatkozó tervezői kitje (PDK – *process design kit*) fölé telepítettük, a PDK alkalmas kiegészítésével (interfész szkriptek, kiterjesztett layout visszafejtő szabályok). Amint megszűnt az adott PDK támogatása, lényegében az elektro-termikus szimulációs rendszerünk gyakorlati megvalósítása is megszűnt.

A felhasználói támogatás problémái miatt az ipari gyakorlatban megvalósított és rutinszerűen használt elektro-termikus szimulációs rendszerek ritkák. Általánosan ismert példa a Mentor ELDO nevű elektro-termikus szimulátora [14], [15], amelynek a folyamatos fejlesztése mögött pl. az ST Microelectronics, mint a Mentor egyik legnagyobb, kiemelt ügyfele áll. (Ez kellő kompetenciát és anyagi háttérrel jelent a megfelelő, egyedi PDK-k kidolgozásához és karbantartásához.)

Az EDA cégek, így a Mentor is, önállóan ritkán kezdenek fundamentálisan új szimulációs módszerek fejlesztésébe. Jellemző az, hogy az érdekelt nagyvállalatok vagy kisebb, innovatív cégek felvásárlása révén jutnak hozzá a megfelelő know-how-hoz, vagy a területen jártas kutatóhelyekkel (egyetemekkel) konzorciumot alkotva fejlesztenek új módszereket és valósítják meg azok pilot implementációit. Egy ilyen munka anyagi háttérét sokszor közfinanszírozás biztosítja. A logi-termikus szimuláció egy implementációját így készítettük el az ST Microelectronics vezette THERMINATOR nevű EU FW7-es projektben, de ilyen jellegű együttműködés a 4. tézisem szerinti LED modellfejlesztést célul kitűző Delphi4LED H2020 projekt is [16].

4. Találkozott az irodalomban a két módszer gyakorlati példán keresztül történt összehasonlításával, vagy van saját tapasztalat a két módszert illetően?

Nem, nem találkoztam az irodalomban részletes, gyakorlati összehasonlítással, csak egy rövid összehasonlító cikket ismerek [17] és a saját tapasztalatom is korlátozott. Sajnos e hivatkozott konferencia közlemény a kérdés szempontjából releváns következtetést nem tartalmaz. A legtöbb elektro-termikus szimulációval foglalkozó publikáció egy saját megoldást közöl és csak elvi síkon foglalkozik az egyéb módszerekkel. Jellemző az, hogy a direkt módszer egy megvalósítását taglaló írás röviden szól a relaxációs módszer problémáiról, míg a relaxációs módszeren alapuló megoldások szerzői jellemzően hallgatnak a direkt módszerről. A BME Elektronikus Eszközök Tanszékén az elektro-termikus szimuláció direkt módszerrel történő megvalósítása mellett Tarnay Kálmán és Székely Vladimír az 1970-es évek közepe táján tette le a voksot, akkori tapasztalataik alapján, így e módszer használata számomra adottság volt.

Saját tapasztalat most formálódik a Delphi4LED H2020-as kutatási projekt [16] keretén belül, ahol a 4. tézisemben közölt LED modell továbbfejlesztett változatának több, egymással ekvivalens implementációját is elkészítettük. Ezek közül a LED modell konstans áramú meghajtás esetére felírt formáját Excel Visual Basic (VB) makrók formájában és Spice netlista formában is megvalósítottuk. A VB makrók tervezett felhasználása egy CFD szimulátorral (FloTHERM) való relaxációs módszeren alapuló multi-domain szimulációs megoldás kialakítása, míg a Spice netlista változatot LED-es lámpatestek direkt módszeren alapuló, rendszerszintű multi-domain Spice szimulációjára szánjuk. A kétféle megközelítés szisztematikus összehasonlítására a közeljövőben adódik lehetőség.

5. Az 1.4. ábrán bemutatott RC-hálózat által generált egyenletrendszer gyors megoldására az áramkör-szimulátorokon belül nincs módszer? A véges elem-módszer által szolgáltatott egyenletrendszerek megoldására például számos technika létezik. Ennek mintájára ki lehet dolgozni a módszert.

De van, pl. Székely Vladimír dolgozott ki egy ilyen módszert 1997-ben (lásd pl.: [18], [19]), amely SUNRED (successive node reduction) algoritmus néven vált közzismertté, és alkalmas áramkör-szimulátorban való implementációra is. Ez a megoldás egy újszerű, a véges differenciák módszerén alapuló termikus szimulátor, az ugyancsak SUNRED néven ismert program kifejlesztéséhez vezetett.

6. Kihasználják ezek az analízátor szoftverek a párhuzamos architektúrákat? Ezáltal akár jelentős gyorsítás is elérhető.

A programok legújabb verziói valamilyen szinten igen. Például a SUNRED program Pohl László által készített megújított változata a többszálú végrehajtás lehetőségével él [20], [21]. Kereskedelmi szoftverek esetében is van multi-core támogatás, lásd pl. [22]-et.

7. A linearitás jogossága merült fel kérdésként. Az 1.2.4. fejezet elején erre röviden kitér. Érdekelne, hogy milyen esetben kellene nemlineáris modellt alkalmazni. Tudna konkrét példát mutatni, amikor a lineáris modell nem alkalmas? Mekkora nehézséget jelentene ennek megvalósítása?

Valóban fontos annak vizsgálata, hogy a lineáris RC rendszer feltételezésnek mik a korlátai. Rencz Márta és Székely Vladimír kimutatta, hogy ha az elektronikai iparban szokásos anyagok hővezető-képességének hőmérsékletfüggését elhanyagoljuk, az kb. 100 °C-os hőmérsékletemelkedés esetében is csak kb. 3%-nál kisebb hibát eredményez az állandósult állapotbeli eredmények tekintetében [23]. Dirk Schweitzer a problémát a több hőforrásos rendszerek jellemzésére használta, a szuperpozíció elve alapján konstruált termikus karakterizációs mátrixok esetében vizsgálta, kiterjesztve az analízist dinamikus esetre is [24]. E munkában a rövid idejű, nagy amplitúdójú 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. Dirk Schweitzer e publikációjában bemutatott mintapélda egy több teljesítmény MOSFET-et tartalmazó autóiipari modul, 200 W fűtő teljesítménnyel.

Nemlineáris kompakt modellek megvalósítása elvi akadályokba nem ütközik; Rencz Márta és Székely Vladimír le is írt ilyeneket a fent hivatkozott közleményben [23] és megadta a szükséges elemek TRANZ-TRAN implementációját is és az ezekkel végezett szimulációk eredményét is.

8. Jól értem azt, hogy a reciprocitás elosztott paraméterű termikus modellt alkalmazó rendszerben automatikusan teljesül? Ha például végeelem-módszerrel számítjuk a hőmérséklet eloszlását.

Igen, jól.

9. A kidolgozott módszer vajon mekkora hibával ad közelítő megoldást a végeelem módszer vagy a véges differenciák alapú eljárásokhoz képest? Történt ilyen jellegű összehasonlítás a módszerek között, akár a 2. fejezetben említett THERMANAL, vagy hasonló alkalmas szoftverrel? Megjegyzem, hogy a mintapéldákkal közölt összehasonlítások meggyőzőek.

Ilyen szisztematikus összehasonlítást a THERMINIC Copernicus projektben (1994-1997) végeztünk. Ennek alapján, illetve ismerve a program(ok)ban alkalmazott közelítő feltevéseket, a következők állíthatók:

- Mivel a THERMAN(AL)-ban homogén anyagrétegek tetején elhelyezkedő 2D alakzatok disszipációjával számolunk, a vezetékvezetés hőterjedést befolyásoló hatása nem vehető figyelembe. Magát a vezetékvezetést is általában elhanyagoljuk a termikus modellben, vagy ha mégis figyelembe vesszünk vezetékvezetés rétegeket, azokat csak (egy izotóp effektív hővezető-képességgel jellemezhető) homogén réteggént építjük be a 3D-s termikus modellbe.
- A THERMAN(AL)-ban alapvetően konstans, hőmérséklet-független anyagparaméterekkel számolunk. Egyes anyagok (így pl. a szilícium) hőmérsékletfüggő hővezető-képességét az ún. Kirchhoff-transzformációjával tudjuk csak figyelembe venni, míg egy FEM vagy FD alapon működő termikus szimulátorban ez a numerikus számítások során automatikusan figyelembe vehető.
- Ha egy FEM vagy FD módszerrel működő szimulátorban pontosan olyan egyszerűsített termikus modellt alkalmazunk, mint amilyen modell a THERMAN(AL)-ban megadható, a végeredmény is ugyanolyan lesz. Tehát a különbségek nem a különböző szimulátorok megoldó algoritmusainak a különbségei miatt, hanem a termikus modellezés során alkalmazott egyszerűsítő feltevések miatt adódnak. Megjegyzendő, hogy a futási idő csökkentése érdekében a FEM/FD szolverek használata során is hasonló egyszerűsítésekkel élnek, mint ami a THERMAN(AL)-ban beépített tulajdonság: homogén, egy effektív hővezető-képességgel jellemzett vezetékvezetés rétegek, konstans termikus anyagparaméterek...

A 2. tézissel kapcsolatos kérdések

10. Felmerült a kérdés, mert a dolgozat nem tér ki rá, hogy a 2.2. ábrán felvázolt és a 2.2.2. alfejezetben bemutatott szimulátor csatolás nem szenved a konvergencia problémáktól?

Nem, nem szenved, ahogy azt az 1. tézissel kapcsolatos 1. kérdésre adott válaszban már kifejtettem.

11. Milyen modell írja le egy kapu elemi eseményéhez tartozó disszipációját?

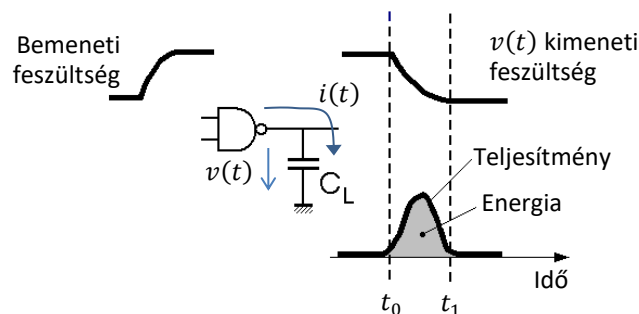
Elvileg tetszőleges modell alkalmazható, de tekintettel arra, hogy CMOS technológiákkal készült digitális cellakönyvtárak fölött implementáltuk a logi-termikus szimulációt, CMOS kapuk átkapcsolási folyamatára jellemző modelleket használunk. A modell természetesen függ attól is, hogy valóban kapu szintű leírással adott áramkörrel van-e szó, vagy esetleg magasabb absztrakciós szinten (pl. RTL) adott modulokból felépített rendszert tekintünk-e. (Magasabb absztrakciós szinten pl. az ún. lineáris regressziós disszipáció modell alkalmazható [25].)

Egy kapu állapotváltásakor fellépő ún. dinamikus disszipáció abból adódik, hogy a kapu kimenetét terhelő C_L kapacitást (1. ábra) a tápfeszültség értékére fel kell tölteni ($0 \rightarrow 1$ átmenet), vagy ki kell sütni ($1 \rightarrow 0$ átmenet). Ha ezen állapotátmenetek f frekvenciával követik egymást, akkor a dinamikus disszipáció $C_L \times V_{dd}^2 \times f$ alakban adható meg. A gond f értékének meghatározása, hiszen egy kapukimenet állapotváltozása nem periodikusan történik, az a bemenetekre adott gerjesztések változásától függ. Ezért egy elemi állapotváltozásra (amit *eseménynek* nevezünk – lásd a 12. kérdést is) vonatkozó (dinamikus) disszipáció a releváns, amely a következőképpen adható meg általánosan:

$$P = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} v(t) \cdot i(t) dt \quad (1)$$

ahol $v(t)$ a kapukimenet feszültségváltozása t_0 és t_1 időpillanatok közt (t_0 : állapotváltozás kezdete, t_1 : állapotváltozás vége), $i(t)$ a kapun átfolyó pillanatnyi áram ugyanezen időintervallumban. Egy elemi eseményre vonatkozó P disszipáció értékét az (1) egyenlet alapján úgy határozhatjuk meg, hogy a kérdéses kapu (standard cella) tranzisztor szintű modelljét használó Spice szimulációk sorozatával megállapítjuk a $v(t)$ és $i(t)$ függvények numerikus értékeit. Az elemi disszipáció (1) szerinti értékét egy cellakönyvtár minden egyes elemére meghatározzuk. Ha a Spice szimulációkat különböző hőmérsékletek mellett végezzük, megkapjuk az egyes kaputípusok elemi disszipációjának hőmérsékletfüggését is.

Az f frekvencia ismeretének hiányát úgy kezeljük, hogy egy nagyobb, τ hosszúságú időintervallumra megszámláljuk, hogy egy adott kapukimeneten hány esemény történik. Az így kapott eseményszámmal megszorozva az elemi disszipáció (1) szerint számított értékét megkapjuk a kérdéses kapu τ időintervallumra vonatkozó teljes disszipációját.



1. ábra: Egy kapukimenet állapotváltozása (itt például $1 \rightarrow 0$ átmenet egy NAND kapun) során disszipált pillanatnyi teljesítmény és energia ([26] cikk 12. ábrája alapján).

A fentiekben vázolt teljesítménymodell elég durva; a modern CMOS gyártástechnológiák esetében alkalmazott modellek részletes áttekintése Tímár András kollégám PhD értekezésének [27] 4. fejezetében található. A logi-termikus szimuláció Tímár András által készített implementációjának lényege az volt, hogy standard EDA környezetekben (IC tervezőrendszer), az ott használatos programok közötti standard interfészekkel és adatbázis információkra támaszkodva készüljön el a megvalósítás, így pl. az időzírtési és disszipációs modellek is egy mai PDK részeként rendelkezésre álló ún. *Liberty File*-ből származnak. Ennek előnye az, hogy egy PDK váltás a megvalósított logi-termikus szimulációs rendszert lényegében nem érinti. Ezzel elkerülhető volt a PDK váltás kapcsán a tranzisztor szintű elektro-termikus szimulációs rendszert érintő, az 1. tézissel kapcsolatos 3. kérdésre adott válaszomban említett probléma.

12. Mit ért eseményűrűség alatt, és ahhoz hogy határozza meg a hőmérsékleteloszlást?

Eseménységűrűség alatt a 11. kérdés kapcsán említett, τ időintervallum alatt bekövetkezett elemi események térbeli eloszlását értem. Célszerűen az egyes kapu példányokra vonatkoztatva történik az események számlálása. Az így kapott eseményszámmal megszorozva az adott kaputípusra vonatkozó (1) összefüggés szerinti P elemi disszipációt megkapjuk az egyes cellákra vonatkozó disszipációk értékét. Így előáll a teljes IC layoutra vonatkozó teljes disszipációeloszlás (figyelembe véve a kapupéldányok méretét és elhelyezkedését is), ami alapján a logi-termikus szimulációs rendszerben aktuálisan használt termikus szimulációs programmal kiszámítjuk az ehhez tartozó hőmérsékleteloszlást.

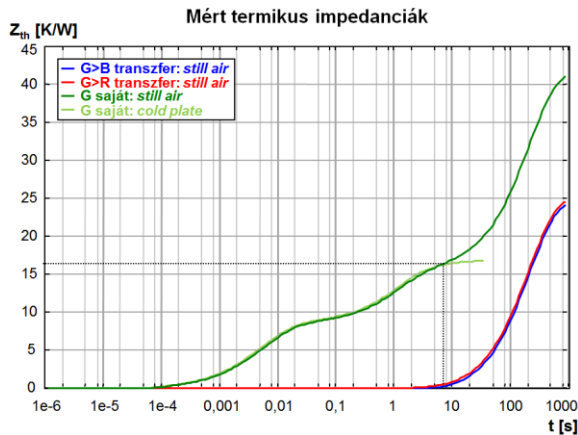
13. Végeztek olyan kísérletet, amelyben összehasonlították a jelen módszert és az 1. tézisben bemutatott módszert, akár egy egyszerű logikai áramkörön? (a tranzisztor szintű modell és a logi-termikus modell összehasonlítása)

Gyűrűs rezgőkör (ring oszcillátor) esetében több esetben (a logi-termikus szimuláció többféle megvalósításával) is végeztünk ilyen vizsgálatot. A legrészletesebb összehasonlítás Tímár András kollégám PhD értekezésének "Validálás és verifikáció" című, 6.7. szakaszában található [27].

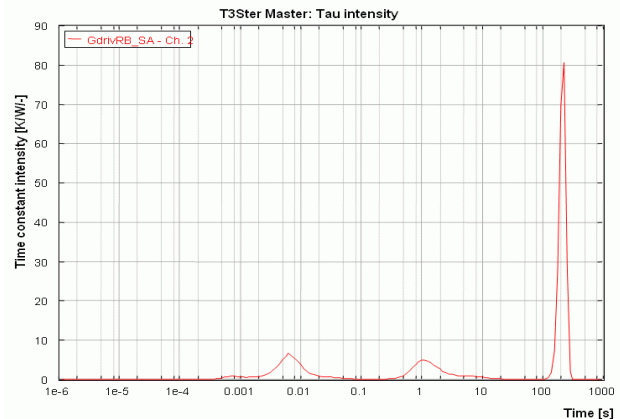
A 3. tézissel kapcsolatos kérdés

14.A 3.3. és 3.4. fejezetekben bemutatott modellek validálását a dolgozat nem mutatja be. Tud mutatni néhány mérési és szimulációs eredményt, illetve azok összehasonlítását, elemzését? Néhány ábra segítené a könnyebb megértést.

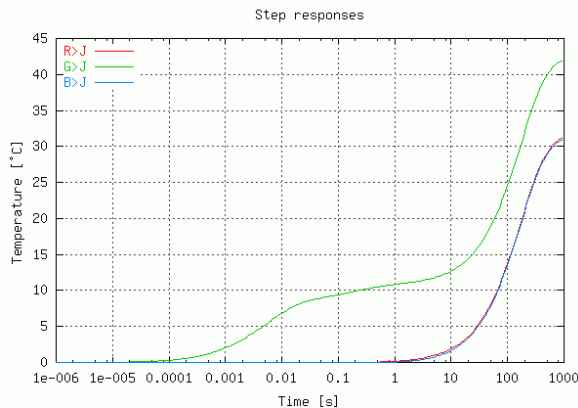
A disszertáció ezekre külön nem tér ki, de a 3.3. szakasz szerinti LED tok modellezéssel kapcsolatos, a 3. tézis egyik alapját is képező 2006-os konferenciaközleményünkben [3] egy ilyen esetet részletesen leírtunk. E cikkből származik a disszertáció 3-13-as ábrája, de a szimuláció és a mérés eredményét összevető ábra a disszertációból valóban kimaradt, azt most a 2. ábrával, a következőkben pótlom.



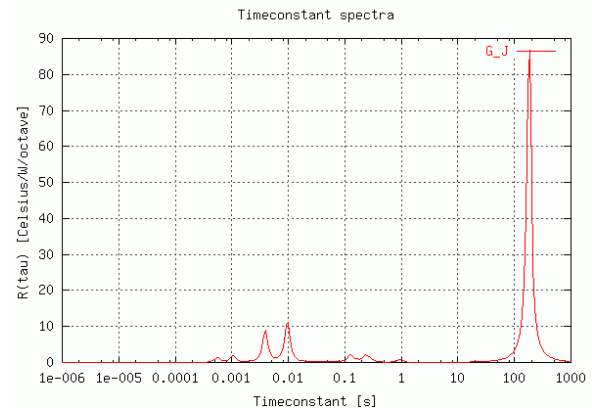
a) A disszertáció 3-13b ábrája ([3] cikk 14. ábrájának magyarított változata): egy RGB LED modul mért termikus impedancia görbéi



b) A [3] cikk 18. ábrája: az a) ábrán bemutatott, a zöld LED mért saját impedanciájának időálló spektruma



c) Az RGB LED modul szimulált impedancia görbéi, a disszertáció 3.3 szakaszában leírt módon meghatározott LED tok modellt felhasználó termikus szimulációval számítva



d) A c) ábrán látható szimulált, a zöld LED-re vonatkozó saját impedancia időálló spektruma

2. ábra: Egy MCPCB-re szerelt RGB LED modul mért és szimulált termikus impedanciái ([3] alapján).

A 2d ábra (szimulált termikus impedancia időálló spektruma) 2b ábrával való egyezése kielégítő. A 200 s körüli csúcs a részletes modellel figyelembe vett MCPCB hordozónak felel meg. A diszkrét vonalakra felhasadt, 1 ms és 1 s közötti csúcsok a LED toknak (és az azon belüli LED chipnek) felelnek meg. Az így adódó diszkrét csúcsok burkoló görbéje jó egyezést mutat a 2b ábrán látható görbe szakaszokkal. A mért impedancia folytonos spektrumának ezen időálló tartományban tapasztalható diszkrét csúcsokra való felhasadása a kompakt modell (koncentrált paraméteres modell) alkalmazásának a következménye. A modell frekvenciatartománybeli validálására a tokmodell és a chip szintű multi-domain LED modell együttes szimulációjából származó eredmények használhatók (direkt AC táplálású LED-ek esete) például úgy, hogy meghatározzuk a LED mért és szimulált disszipáció hullámformájának felharmonikus tartalmát. Ilyen jellegű méréseket Temesvölgyi Tamás volt doktoranduszom végzett a Mentor Graphics-ban [28].

A 2a és 2c ábrákon a mért saját impedanciák (zöld görbék), amelyek szempontjából a LED tok hatása meghatározó, jó egyezést mutatnak. A kék és piros görbék által reprezentált transzfer impedanciák esetében azonban kevésbé jó az egyezés: a szimulációval kapott görbék magasabb hőmérsékletnél érik el az állandósult állapotot. Erre a magyarázat az, hogy a transzfer impedanciák szempontjából meghatározó az áramköri hordozó és a hideg lemez közötti termikus határfelületi anyagréteg hővezetőképessége / vastagsága, ami a LED tok kompakt modelljét befoglaló részletes modell egy fontos paramétere. Ahogy arra az 1. kérdésre adott válaszom végén utaltam, az ilyen jellegű termikus modellparaméterek tekintetében nagy a bizonytalanság. Természetesen létező struktúrák esetében ma már van lehetőség a részletes 3D szimulációs modellek mérési eredmények alapján történő, akár automatikus finomhangolására is [29].

A 4. tézissel kapcsolatos kérdés

15.A 4.4. fejezetet olvasva bennem is felmerült nagyjából az a kérdés, amit a Jelölt a 4.4.2. fejezetben feltesz: „Hagyjunk figyelmen kívül minden elméleti megfontolásból származó összefüggést...”, hiszen pont az elméleti összefüggéseket járja körül. Miért nem indult el egyszerűen a (65) összefüggésből, ami elég általános? Ez számomra itt kissé zavaró, hiszen egy modellt tetszőleges irányokba lehet bonyolítani, javítani, módosítani.

Sajnálom, ha a Bírálót megzavarta a 4.4.2. szakaszban a felsorolt lehetőségek kapcsán az első opcióként említett “Hagyjunk figyelmen kívül minden elméleti megfontolásból származó összefüggést” mondat. A célom ezzel a “költői kijelentéssel” az volt, hogy (ahogy a Bíráló is javasolta), tekintsük át, hogy az $I_0(T_j)$ összefüggést leíró, a disszertáció (65) képletével leírt általános összefüggésben mit lehet egyszerűsíteni. Ezen összehasonlítás számomra teljesen meggyőző és kielégítő eredménye az lett, hogy a disszertációm (65)-ös összefüggése LED-ek esetében is arra a szintre egyszerűsíthető, amely megfelel a TRANZ-TRAN programban évtizedek óta az $I_0(T_j)$ reláció leírására használt modellnek. Ezen egyszerű modell használatára a Spice program különböző változatai is “utasíthatóak”. Ez azért fontos, mert így egy, a lehető legkisebb számításigényű, egységes módon implementálható modellt használhatunk a LED-ek esetében is a szaturációs áram hőmérsékletfüggésének leírására. Ezt tettük a Delphi4LED projekt [16] esetében is, ahol a 4. tézisben ismertetett LED modellem továbbfejlesztett változatát [30] egy Excel számológéptábla alkalmazásba beágyazott Visual Basic makro, illetve gnereikus Spice áramköri makro formájában is megvalósítottuk 2018. júliusában.

Hivatkozások:

- [1] A. Poppe, "Simulation of LED Based Luminaires by Using Multi-Domain Compact Models of LEDs and Compact Thermal Models of their Thermal Environment", *MICROELECTRONICS RELIABILITY* **72**(5): 65-74 (2017), DOI: 10.1016/j.microrel.2017.03.039
- [2] A. Poppe, "Multi-domain compact modeling of LEDs: an overview of models and experimental data", *MICROELECTRONICS JOURNAL* **46**(12 A): 1138-1151. (2015), DOI: 10.1016/j.mejo.2015.09.013
- [3] A. Poppe, G. Farkas, V. Székely, Gy. Horváth, M. Rencz, "Multi-domain simulation and measurement of power LED-s and power LED assemblies", In: Proc. of the 22nd IEEE SEMI-THERM Symp., 14-16 March 2006, Dallas, USA, pp. 191-198, DOI: 10.1109/STHERM.2006.1625227
- [4] G. Farkas, Q. van Voorst Vader, A. Poppe, Gy. Bognár, "Thermal Investigation of High Power Optical Devices by Transient Testing", *IEEE TR. ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES* **28**(1): 45-50. (2005), DOI: 10.1109/TCAPT.2004.843197
- [5] V. Székely, A. Poppe, A. Páhi, A. Csendes, G. Hajas, M. Rencz, "Electro-thermal and logi-thermal simulation of VLSI designs", *IEEE TR. ON VERY LARGE SCALE INTEGRATION (VLSI) SYSTEMS* **5**(3): 258-269. (1997), DOI: 10.1109/92.609868
- [6] H.I. Rosten, C.J.M. Lasance, J.D. Parry, "The world of thermal characterization according to DELPHI - Part I: Background to DELPHI", *IEEE TR. ON COMPONENTS, PACKAGING, AND MANUFACTURING TECHNOLOGY PART A* **20**(4): 384-391 (1997), DOI: 10.1109/95.650927
- [7] C.J.M. Lasance, H.I. Rosten, J.D. Parry, "The world of thermal characterization according to DELPHI - Part II: Experimental and numerical methods", *IEEE TR. ON COMPONENTS, PACKAGING, AND MANUFACTURING TECHNOLOGY PART A* **20**(4): 392-398 (1997), DOI: 10.1109/95.650928
- [8] JEDEC Standard JESD15-4, "DELPHI Compact Thermal Model Guideline" (2008), www.jedec.org/sites/default/files/docs/JESD15-4.pdf
- [9] Mentor FloTHERM PACK program termékismertető honlap: <https://www.mentor.com/products/mechanical/flotherm/flotherm-pack/>
- [10] C. G. Broyden, "Class of Methods for Solving Nonlinear Simultaneous Equations", *Mathematics of Computation*, **19**(92): 577-593 (Oct., 1965), DOI: 10.2307/2003941
- [11] F. H. Branin, H. H. Wang, "A fast reliable iteration method for dc analysis of nonlinear networks", *Proceedings of the IEEE*, **55**(11): 1819-1826 (1967), DOI: 10.1109/PROC.1967.6013
- [12] Székely Vladimír, Poppe András, "Áramkörszimuláció a PC-n", ComputerBooks, Budapest, 1996, ISBN: 963 618 080 6

- [13] Wei Huang, S. Ghosh, S. Velusamy, K. Sankaranarayanan, K. Skadron, M.R. Stan, "HotSpot: a compact thermal modeling methodology for early-stage VLSI design", *IEEE TR. ON VERY LARGE SCALE INTEGRATION (VLSI) SYSTEMS* **14**(5): 501-513 (2006), DOI: 10.1109/TVLSI.2006.876103
- [14] Ph. Raynaud, "Single Kernel Electro-Thermal IC Simulator", In: Proc. of the 19th THERMINIC Workshop, 25-27 September 2013, Berlin, Germany, pp. 356-358, DOI: 10.1109/THERMINIC.2013.6675231
- [15] Mentor ELDO Platform áttekintő honlap: https://www.mentor.com/products/ic_nanometer_design/analog-mixed-signal-verification/eldo-platform
- [16] A Delphi4LED projekt honlapja: www.delphi4LED.org
- [17] H. M. Gutierrez, C. E. Christoffersen, M. B. Steer, "An Integrated Environment for the Simulation of Electrical, Thermal and Electromagnetic Interactions in High-Performance Integrated Circuits", In: Proc of the IEEE 8th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging, 25-27 Oct. 1999, San Diego, pp. 217-220, DOI: 10.1109/EPEP.1999.819229
- [18] Zs. Kohári, V. Székely, M. Rencz, A. Páhi, V. Dudek, B. Höflinger, "Studies on the heat removal features of stacked SOI structures with a dedicated field solver program (SUNRED)", *MICROELECTRONICS RELIABILITY* **38**(12): 1881–1891 (1998), DOI: 10.1109/ESSDERC.1997.194474
- [19] A. Páhi, V. Székely, M. Rosenthal, M. Rencz, "3D extension of the SUNRED field solver", In: Proc. of the 4th THERMINIC Workshop, 21-23 September 1998, Cannes, France, pp. 185–190, hungary.pure.elsevier.com/en/publications/3d-extension-of-the-sunred-field-solver
- [20] L. Pohl, "Multithreading and Strassen's algorithms in SUNRED field solver", In: Proc. of the 14th THERMINIC Workshop, 24-26 September 2008, Rome, Italy pp. 137–141., DOI: 10.1109/THERMINIC.2008.4669895
- [21] Pohl László, "Speciális félvezetőeszközök szimulációja szukcesszív hálózatredukciós módszerrel", PhD értekezés, BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2012 (témavezető: dr. Székely Vladimír), www.eet.bme.hu/~pohl/disszertacio_vegleges_F4_gyel.pdf
- [22] Mentor FloTHERM program specifikációs adatlap: www.mentor.com/products/mechanical/flotherm/flotherm/technical-specifications
- [23] M. Rencz, V. Székely, "Studies on the non/linearity effects in dynamic compact model generation of packages", *IEEE Tr. on Components and Packaging Technology* **27**(1): 124-130 (2004), DOI: 10.1109/TCAPT.2004.825750
- [24] D. Schweitzer, "Thermal Transient Characterization of Semiconductor Devices With Multiple Heat Sources – Fundamentals for a New Thermal Standard", In: Proc. of the 19th THERMINIC Workshop, 25-27 September 2013, Berlin, Germany, pp. 301-304, DOI: 10.1109/THERMINIC.2013.6675248
- [25] A. Bogliolo, L. Benini, and G. De Micheli, "Regression-based RTL Power Modeling", *ACM Trans. Des. Autom. Electron. Syst.*, **5**(3): 337–372 (2000), DOI: 10.1145/348019.348081
- [26] M. Rencz, V. Székely, A. Poppe, K. Torki, B. Courtois, "Electro-thermal simulation for the prediction of chip operation within the package", In: Proc. of the 19th IEEE SEMI-THERM Symp., 11-13 March 2003, San Jose, USA, pp. 168-175, DOI: 10.1109/STHERM.2003.1194357
- [27] Timár András, "Logi-termikus szimuláció sztenderd tervező rendszerekben", PhD értekezés, BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, 2013 (témavezető: dr. Rencz Márta), http://www.omikk.bme.hu/collections/phd/Villamosmernoki_es_Informatikai_Kar/2013/Timar_Andras/ertekezes.pdf
- [28] A. Poppe, T. Temesvölgyi, "A General Multi-domain LED Model and its Validation by Means of AC Thermal Impedance", In: Proc. of the 29th IEEE SEMI-THERM Symp., 17-21 March 2013, San Jose, USA, pp. 137-142, DOI: 10.1109/SEMI-THERM.2013.6526818
- [29] B. Blackmore, "Automatic calibration of detailed IC package models", In: Proc. of the 32nd IEEE SEMI-THERM Symp., 14-17 March 2016, San Jose, USA, pp. 105-112, DOI: 10.1109/SEMI-THERM.2016.7458454
- [30] G. Hantos, J. Hegedüs, M. C. Bein, L. Gaál, G. Farkas, Z. Sárkány, S. Ress, 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

Budapest, 2018. augusztus 24.

Poppe András