

Bírálói vélemény

Poppe András

Félvezető eszközök multi-domain karakterizációja

című MTA Doktori értekezéséről

A dolgozat analóg és digitális áramkörök koncentrált paraméterű modellezésével foglalkozik, ahol központi szerepet kap a termikus és a fénytechnikai viselkedés szisztematikus leírása. Az elektromos viselkedést, a hőáramot, illetve az optikai sugárzást pontosan leíró elosztott paraméterű modellezés helyett a jelenségeket koncentrált paraméterű modellel veszi figyelembe, miáltal egy csatolt rendszer áll elő a figyelembe venni kívánt jelenségek együttes modellezésére. A melegedés okozta termikus problémák alapvető fontosságúak, melyeket az áramkör tervezése során figyelembe véve, lehetőség nyílik a termikus csatolások feltárására, a hibák detektálására, a hűtési megoldások tervezésére stb. Ezek óriási előnyt nyújtanak a tervező mérnök számára. **A témaválasztás** a fentiek alapján **időszerű**.

A multi-domain karakterizáció azt jelenti, hogy egy áramkör elektromos és termikus viselkedését együttesen, szimultán vizsgálja. LED-ek esetében mindez kiegészül a fénytechnikai viselkedés vizsgálatával is. Azaz két, vagy három fizikai jelenség egymásra gyakorolt hatását is figyelembe tudja venni.

Ennek a témakörnek a BME Elektronikus Eszközök Tanszékén Tarnay Kálmán és Székely Vladimír professzoroknak és a jól ismert TRANZ-TRAN programnak köszönhetően nagy múltja van, ahogy azt az **Előszó**ban is olvashatjuk. A Jelölt ezen Iskola tagjaként fejleszti és viszi tovább a területet, véleményem szerint jelentősen gazdagítva azt.

A jelen mű az 1996 óta (kandidátusi értekezés védésének időpontja) **végzett tudományos tevékenység összefoglalása**, amelyet két nagy részre tudok felosztani:

- Az első nagyobb rész (1. és 2. fejezet) analóg és digitális áramkörök villamos és termikus analízisével foglalkozik, amely a dolgozat 1. és 2. tézisét adja;
- A második rész (3. és 4. fejezet) LED-ek vizsgálatával foglalkozik, a 3. és 4. téziseket eredményezve.

Az **1. fejezet**ben az irodalomra támaszkodva bevezeti a szimulátor csatolást és a szimultán iterációt. Mindkettő célja, hogy a csatolt elektro-termikus jelenség egyenleteit megoldja. Analóg áramkörök vizsgálatára az 1. tézisben az utóbbi módszert, míg digitális áramkörök

analízisében a 2. tételben az előbbi módszert használja. A következő kérdések fogalmazódtak meg bennem:

- A szimulátor csatolás nagy hátrányaként említi, hogy konvergenciája kétséges, illetve, konvergens megoldás esetén annak helyessége kétségbe vonható. A 2. tételbeli alkalmazása miatt kérem, mutassa be, hogyan lehet ezt a módszert biztos konvergenciára bírni. Hogyan győződhetünk meg a megoldás helyességéről?
- A szimulátor csatolás nagy futási ideje nem volna csökkenthető koncentrált paraméterű termikus modell segítségével? Vannak/voltak erre kísérletek?
- 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?
- Találkozott az irodalomban a két módszer gyakorlati példán keresztül történt összehasonlításával, vagy van saját tapasztalat a két módszert illetően?

Az áramkör környezetének termikus modelljével az 1.2. fejezet foglalkozik. Az 1.2.3. fejezet mutatja be részletesen a saját tudományos eredményeket. A modell egy ún. termikus karakterizációs mátrix szisztematikus feltöltésén alapszik, aminek implementálása egy áramkörszimulátorban viszonylag könnyen megtehető. Ez a módszer állandósult állapotbeli vizsgálatokra alkalmas. A következő kérdéseket teszem fel:

- Az 1.4. ábrán bemutatott RC-hálózat által generált egyenletrendszer gyors megoldására az áramkörszimulátorokon belül nincs módszer? A véges elem-módszer által szolgáltatott egyenletrendszerek megoldására például számos technika létezik. Ennek mintájára ki lehet dolgozni a módszert.
- Kihasználják ezek az analízátor szoftverek a párhuzamos architektúrákat? Ezáltal akár jelentős gyorsítás is elérhető.
- 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?
- Jól értem azt, hogy a reciprocitás elosztott paraméterű termikus modellt alkalmazó rendszerben automatikusan teljesül? Ha például véges elem-módszerrel számítjuk a hőmérséklet eloszlását.
- A kidolgozott módszer vajon mekkora hibával ad közelítő megoldást a véges elem-módszer vagy a véges differenciákon 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.

Az 1.4. és 1.5. fejezetek a módszer kiterjesztéseit taglalják: például a dinamikus vizsgálatokat. Az 1.6. fejezet szimulációs mintapéldákon mutatja be az elmondottakat. Az 1. fejezetet az 1. tétel zárja.

A **2. fejezet** az ún. logi-termikus szimulációkkal foglalkozik, melynek célja, hogy a logikai műveleteket végző digitális integrált áramkörök analízisét ne tranzisztor szinten, hanem a logikai áramkörök vizsgálatánál szokásos magasabb absztrakciós szinten végezze el, mellyel az analízis futási ideje jelentősen csökkenthető. Szimultán vizsgálja a kapuk disszipációját és az ennek hatására bekövetkező paraméterváltozásokat. A két modellezendő probléma absztrakciós szintbeli különbsége miatt a szimulátor csatolást kell alkalmazni az analízisben (2.2.2. alfejezet), egyelőre a stacionárius állapot meghatározását megcélózva. Néhány kérdés fogalmazódott meg:

- 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 konvergenciaproblémáktól?
- Milyen modell írja le egy kapu elemi eseményéhez tartozó disszipációját?
- Mit ért eseménysűrűség alatt, és ahhoz hogy határozza meg a hőmérsékleteloszlást?
- 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)

A 2.3. és 2.4. fejezetek a módszer kiterjesztésével és további fejlesztési irányjaival foglalkoznak. A fejezetet a 2. tézis zárja.

A **3. fejezet** a LED-ek kombinált vizsgálatával foglalkozik: elektromos, termikus és optikai mérésekkel és szimulációkkal. A 3.2. fejezetben rávilágít a LED-ekre vonatkozó termikus mérések szabványainak hiányosságaira és egy új, konzisztens mérési rendszer elvi és gyakorlati felépítését mutatja be. Ezáltal a LED elektromos, termikus és optikai tulajdonságai egyszerre mérhetők. Ezután, a 3.3. fejezetben, elvégzi a méréseken alapuló termikus kompakt modell megalkotását és a modell AC LED-ek leírására történő kiterjesztését (3.4. fejezet). Utóbbi esetre bevezeti az effektív AC termikus impedancia fogalmát. Ezt a fejezetet a 3. tézis zárja. Egy kérdés megválaszolására kérem a Jelöltet:

- 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 **4. fejezet** a LED-ek multidomain szimulációjával foglalkozik. Az irodalomból ismert fontosabbnak tartott modellek kritikai elemzését (4.1. fejezet) követően bemutatja az általa kidolgozott LED-modellt (4.1. és 4.2. fejezetek), amely alkalmas az elektromos jelenségek leírása mellett a termikus és az optikai folyamatok modellezésére is. A 4.3. és 4.4. fejezetekben a modellparaméterek viselkedését vizsgálja, és számos eredményt sorakoztat fel a szimulációs és mérési eredmények összehasonlítására (pont ezt hiányolom a 3. fejezetből). Egy megjegyzésem, kérdésem van a fejezettel kapcsolatban:

- 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.

A 4.5. fejezet néhány gyakorlati szempontból lényeges alkalmazást és eredményt mutat be, ami véleményem szerint növeli a modell hitelességét. A kitekintő 4.6. fejezet után a tézisek megfogalmazása zárja a fejezetet.

A LED-ek méréséhez és modellezéséhez kapcsolható, itt felsorakoztatott és bemutatott irodalom nagyon gyérnek mondható, így a Jelölt ezirányú munkássága feltétlenül kiemelendő.

Megjegyzem, hogy számomra a 4. fejezet a 3. fejezet logikus folytatása, a kettő együtt egy nagyon erős gyakorlati-elméleti egységet alkot. Többször történik utalás a 3. fejezet eredményeire.

Az **5. fejezet** az elért tudományos eredmények hasznosíthatóságát mutatja be röviden. A felsorakoztatott eredmények véleményem szerint hűen tükrözik a kidolgozott módszerek jó ipari alkalmazhatóságát.

A dolgozat az **irodalmi hivatkozások** felsorolásával zárul: a tézisekhez szorosan kapcsolódó publikációkat (70db) és a felhasznált irodalom hivatkozásait (161db) sorolja fel.

Az elvégzett munka nagy értékének tartom, hogy az elmondottak implementálása is megtörtént, s ezáltal konkrét CAD-tervező programok jöttek létre. Ezek nagy mértékben megkönnyítik a tervező mérnökök munkáját.

A nemzetközi elismertséget tükrözi az MTMT-adatbázisban megtalálható 293 közleményre érkezett 1172 független hivatkozás (2018. július 17-ei adat).

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 független

formájában a dolgozathoz kapcsolni. Ugyanakkor a közel 100 oldalas dolgozat stílusa gördülékeny, olvasmányos, szépen szerkesztett műről van szó.

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.

A Jelölt téziseit új tudományos eredménynek elfogadom.

Összefoglalva, a doktori művet nyilvános vitára alkalmasnak tartom, és javaslom annak kitűzését.

Győr, 2018. július 17.

Kuczmann Miklós

az MTA Doktora