



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Elektrotermikus mikrorendszerek modellezése és karakterizációja

Doktori értekezés téziszülete

Szerző: Szabó Péter Gábor
okleveles villamosmérnök

Témavezető: Dr. Székely Vladimír
egyetemi tanár
MTA rendes tagja

Elektronikus Eszközök Tanszéke
Budapest, 2011.

1. Kutatások előzménye

A PhD kutatásaim során a mai modern szenzoregységek alapjait szolgáló különféle elektrotermikus, illetve elektromechanikus mikrorendszerek modellezésével, karakterizációjával és méréstechnikájával foglalkoztam. Kísérleteim során részletesen tanulmányoztam a mikro- és makro méretű eszközökben lezajló hőátadási és hővezetési folyamatokat, a mikroeszközökben lejátszódó másodlagos, ugyanakkor a működést jelentősen befolyásoló hatásokat, valamint a mikroelektromechanikus rendszerekben (MEMS-ekben) fellépő fizikai keresztteffektusokat, melyek az érzékelők és beavatkozók működéséért felelősek. Külön foglalkoztam a kis (μm -es nagyságrendű) méretből fakadó vilamos mérések hibájának kiküszöbölésével, nem szokványos mérési eljárások alkalmazásával. Az elmúlt években számos hazai és nemzetközi projektben dolgoztam (PATENT DfMM, NanoPack, Eniac SE2A), melyek eredményei nagyban hozzájárultak kutatómunkám eredményességéhez.

Az elmúlt évtizedekben az integrált áramkörökhöz hasonlóan az érzékelő és beavatkozó rendszerek is jelentős méretcsökkenésen mentek keresztül. A kifinomult IC gyártástechnológiák rendkívül jó alapul szolgáltak a félvezető szenzorok számára. Habár az előállítási technológiák nem alkalmazhatóak ugyanabban a formában, a kiforrott technikák és eszközök rendkívül jól hasznosíthatóak a megfelelő módosítások után. Külön figyelemreméltó, hogy a méretek tekintetében a félvezető alapú szenzorok és az integrált áramkörök között hozzávetőleg egy nagyságrendi különbség van. Ebből kifolyólag az olcsóbb és nem csúcstechnológiás gyártósort használó vállalatok és intézmények is versenyképesek lehetnek a nagyobb, jobban finanszírozott konkurenciához képest. Így, ezen a téren az USA-hoz képest az európai, az európaihoz képest pedig a hazai vállalatok és intézmények is sikeresek lehetnek.

A modern érzékelő és beavatkozó rendszerek meghatározó elemei az úgy nevezett mikro-(opto)elektromechanikus (M(O)EMS) szerkeze-

tek. Ezek jellemzően olyan, egy millimétertől egy mikrométer hosszúságig terjedő eszközök, melyek az elektromágneses-, optikai-, kémiai-, termikus és mechanikus tulajdonságaikat kihasználva elektromos jelet állítanak elő egy áramkör számára vagy beavatkoznak a környezetükbe. Napjainkban az egyik legnagyobb felhasználási területük a közlekedés biztonságtechnika, ahol a legkifinomultabb rendszerek a gépkocsik - és repülőek érzékelőiben találhatóak meg, de ilyen eszközök működnek tűzjelző rendszerekben, ujjlenyomat olvasókban, számítógép alkatrészekben és számos egyéb eszközben, berendezésben is. Kutatóintézetek foglalkoznak olyan megoldásokkal is, melyek segítségével korábban elképzelhetetlen orvosi alkalmazások is valóra válhatnak. Jellemző kutatási irányok ezen a területen a mesterséges implantátumok (mesterséges szem, cochlear implantátum), biometriai rendszerek (vércukorszint mérés, pulzoximetria), valamint a Lab-on-a-chip rendszerek, ahol egy chip-en többféle laboratóriumi funkciót valósítanak meg. Ugyanakkor számos hadászati és rendészeti feladatra is igénybe vehetőek ezek a rendszerek, ezért is élvezzi számos kutatóintézet a hadsereg, illetve a hadügyminisztérium támogatását.

Mielőtt azonban az ilyen és ehhez hasonló MEMS-ek belekerülnek egy, a mindennapjainkban használt érzékelő rendszerbe, a kísérletektől számítva még számos tervezési, fejlesztési cikluson mennek keresztül. Az eszközök tervezéséhez szükséges ismerni a részletes működésüket, melyekhez elengedhetetlenek a pontos és helytálló fizikai-, illetve viselkedési modellek. Az anyag - és fizikai paraméterek meghatározásához a fejlesztések első szakaszában rendszerint tesztstruktúrákat gyártanak, melyeket a különböző karakterizációs eljárások eredményeitől függően optimalizálnak. Kutatásaim során én is ilyen mikrométerű elektrotermikus tesztstruktúrákkal foglalkoztam. Kiemelt hangsúlyt helyeztem a szerkezetek pontos modellezésére és a hozzájuk tartozó megfelelő karakterizációs eljárások kidolgozására. Mindezek mellett jelentős igény van arra is, hogy a már elkészült, akár az iparban is használt mikrorendszereket képesek legyünk lemérni és megállapítani az esetleges meghibásodások vagy helytelen

működés okát. Ehhez az eszközök tesztelhetőre tervezése mellett (DfT – Design for Testability) kellenek olyan áramköri és mérés technikai megoldások is, amelyek segítségével meghatározhatjuk, hogy a szerkezeteink a specifikációnak megfelelően működnek-e. A mérési stratégia kidolgozásánál komoly figyelmet kell fordítani arra, hogy már maga a mérés is beleszólhat az eszköz működésébe vagy a zajok elnyomhatják a hasznos jelet.

Összefoglalóan tehát azt mondhatjuk, hogy a mikrorendszerek tervezésekor rendkívül fontos, hogy rendelkezésre álljanak olyan modellek és karakterizációs eljárások, amelyek segítik a tervezőmérnököt abban, hogy a lehető legoptimálisabb eszközt tudja megtervezni. Egy másik hasonlóan fontos igény, hogy a már elkészült eszközök működését a későbbi fejlesztési szempontok, illetve meghibásodási mechanizmusok létrejöttét is figyelemmel kell tudni kíséreni, mely újfajta mérési eljárásokat igényel. Ezeket az igényeket a MEMS tervezésnél is rendkívül fontos figyelembe venni, illetve kiemelt fontossággal kezelni. Disszertációmban ennek elősegítése, elméleti és gyakorlati megalapozása érdekében végzett kutatómunkám során létrejött eredményeimet és elgondolásaimat szeretném ismertetni.

2. A kutatások célkitűzései

Doktori kutatásaim egyik fő célja, négyzetes transzfer karakterisztikájú (QTC) MEMS elemek karakterizálása és modellezése annak érdekében, hogy megismerhessük a részletes működésüket. Az érzékelők és beavatkozók fejlesztésének már a korai szakaszában - még mielőtt gyártásba, illetve mindennapi használatba kerülnének - pontos leírást kell adni az eszközök várható viselkedéséről, illetve arról, hogy milyen effektusok befolyásolják a működést. Ilyen célokra különböző tesztstruktúrákat használnak, melyekkel egyrészt meghatározhatók és pontosíthatóak a gyártási paraméterek, másrészt az esetleges nem várt hatások kiküszöbölésére tervezési ajánlásokat lehet megfogalmazni. Ezt követően a fejlesztések későbbi szakaszában, amikor

a mikrorendszerek funkcionalitását már a kiértékelő elektronikával együtt kell szimulálni, nélkülözhetetlen egy megfelelő helyettesítő áramkörü modell. Egy optimális eszköz megalkotásához azonban elengedhetetlen, hogy ezek a helyettesítő képek tartalmazzák valamennyi, a karakterizáció során feltárt paramétert. Munkám során az elektrotermikus mikrorendszerek egy speciális csoportjához, a négyzetes transzfer karakterisztikájú (quadrature transfer characteristics - QTC) MEMS-ekhez végeztem el a karakterizációs eljárásokat ezen szempontok figyelembevételével.

Kutatómunkám másik célkitűzése a termikus tranziens mérések során keletkező nem kívánt elektromos komponensek és a termikus tagok szétválasztása volt. A tranziens mérések kezdeti szakaszában ugyanis, az elektromos csatolások következtében tüskék és más, a mérés pontosságát befolyásoló tagok jelenhetnek meg a válaszfüggvényben. A jelenleg létező megoldások, melyekkel a görbék inflexiók vagy minimum pontjára illeszthetünk lineáris vagy gyökös függvényt, nem kielégítőek, hogyha kis időállandójú struktúrák, például MEMS-ek mérését végezzük. Az általam kidolgozásra kerülő, új karakterizációs eljárások segítségével lehetőség nyílik többféle gerjesztő impulzussal történt mérések előzetes feldolgozása után kiejteni, illetve minimalizálni ezt a hibát, ezáltal javítva a mérés pontosságát.

3. Felhasznált eszközök és vizsgálati módszerek

Mivel már munkám korai szakaszában látható volt, hogy az egyik fő kutatási irány az elektrotermikus modellezés és mérés technika lesz, ezért először meg kellett ismerkednem a különféle mikrorendszerek, mikroelektronikai elemek termikus viselkedésének elméletével, valamint a hozzájuk kapcsolódó fizikai keresztteffektusokkal. Ennek folyamányaként a folyóiratokból és szakkönyvekből megszerzett tudás segítségével, pedig analitikai módszereket dolgoztam ki a mért eredmények ellenőrzésére.

Fokozott körültekintéssel tanulmányoztam az elektrotermikus modellezés kérdéseit és a modellem különböző áramkör szimulációs programokba történő implementálhatóságának lehetőségeit. Megvizsgáltam a fizikai keresztjeffektusok és a termikus paraméterek analógiáját az elektromos elemekkel a megfelelő helyettesítő kép kidolgozásának érdekében.

Kutatásaim során számos speciális matematikai megoldási módszerrel ismerkedtem meg, melyek lehetővé tették az eredmények megfelelő feldolgozását. Az elméleti felkészülés és megalapozás mellett elsajátítottam olyan speciális műszerek, illetve berendezések használatát, mint a T3Ster termikus tranziens teszter, valamint az Alcatel katódporlasztó és a hozzátartozó vákuumrendszer. Külön figyelmet fordítottam arra, hogy megvizsgáljam, hogy a mindennapi mérnöki feladatok során használt műszerek, mint oszcilloszkóp, multiméter mennyire befolyásolják a mérés pontosságát.

A mérési eredmények verifikálására és elemzésére különféle matematikai és szimulációs programokat használtam. A munkám előrehaladtával professzionális szinten megtanultam kezelni a MATLAB és SUNRED programokat, megismerkedtem az ANSYS multifizikai szimulátorral, valamint számos, a Mentor Graphics cég által fejlesztett szimulációs - (Eldo, Flotherm) és feldolgozó programmal (T3Ster-Master, EZwave). Ezen szoftverek hathatós segítségével értelmeztem és ellenőriztem az eredményeimet.

4. A kutatómunka új tudományos eredményei

4.1. 1. Tézis

Karakterizációs eljárást dolgoztam ki QTC (négyzetes transzfer karakterisztikájú) temoelektromos MEMS elemek elméleti és kísérleti vizsgálatára. Az alap működési effektusok leírásán túlmenően meghatároztam a másodlagos effektusok és a méretcsökkenésből adódó jelenségek hatását és kidolgoztam a mérésükhöz szükséges módszere-

ket.

1.1. Megvizsgáltam a QTC elem ideális karakterisztikától való eltérését. Megállapítottam, hogy a hőmérsékletfüggés következtében létrejövő nemlinearitások páros számú harmonikusokat eredményeznek a spektrumban. Ennek alapján javaslatot tettem az előírt torzítási mérték betartásának feltételeire.

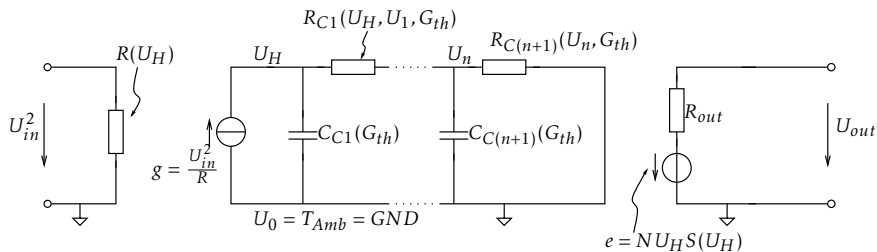
1.2. Megállapítottam és kísérletileg is kimutattam, hogy a mikro-szerkezeteken elhelyezett fűtőellenállások alumínium-poliszilícium kontaktusain, a fűtőáram következtében létrejövő Peltier-effektus jelentős. Az effektus a teljes melegedés 10 %-a nagyságrendjébe eső hőmérsékletkülönbséget is okozhat, ezzel megváltoztatva a hőmérséklet eloszlás szimmetriáját és befolyásolva az eszköz működését. Megfogalmaztam azokat a konstrukciós elveket, amelyekkel a működés megzavarása elkerülhető. Kimutattam, hogy szimmetrikus elrendezés esetén az effektus nem befolyásolja a működést.

1.3. Megvizsgáltam az elektrotermikus mikrorendszerek viselkedését vákuumtérben és normál atmoszférikus viszonyok között. Kimutattam, hogy a szilícium hordozótól termikus szempontból megfelelően elszigetelt mikrorendszereknél adott hőmérsékleti tartományon a viselkedést, illetve az átviteli karakterisztikákat jelentősen befolyásolja, ha gáz halmazállapotú anyag veszi körül a struktúrát. A gáztér párhuzamos hővezetési útként jelentkezik. A tápvonal elméletre támaszkodva elméletileg kimutattam a QTC elem termikus időállandóinak eltolódását a levegő jelenléte következtében. Az eltolódást kísérletileg is kimutattam, termikus tranziens méréseket végezve.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [S1, S2, S3, S4]

4.2. 2. Tézis

Alkatrész szintű áramköri modellt dolgoztam ki a QTC elemek viselkedésének pontos leírására. A modell bázisa a termikus struktúrát leíró elektromos RC hálózat, amelynek elemei a tranziens mérés eredményeiből dekonvolúcióval számolt időállandó spektrumból adódnak.



1. ábra. QTC MEMS helyettesítőképe

Az elektrotermikus csatolások vezérelt generátorokkal írhatóak le. A modell segítségével áramkör szimulációs programmal követhetjük a QTC MEMS elem működését.

2.1. A modellbe beépítettem az egyes elemek hőmérsékletfüggését is, melyeket egy tesztstruktúrára vonatkozóan mérésekkel határoztam meg.

2.2. A modellbe beépítettem a struktúrát körülvevő gáz hatását is, az 1.3. tézis szerint nyert kísérleti adatok alapján.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [S1, S2, S3, S4]

4.3. 3. Tézis

Újfajta mérési és feldolgozási eljárásokat dolgoztam ki a termikus tranzien্স mérések során kellemetlen zavaró tényezőként jelentkező, a gerjesztés és a kimenet közötti elektromos csatolás, áthallás csökkentésére.

3.1. Kísérletileg kimutattam, hogy ha a QTC elem tranzien্স mérését a gerjesztés kétféle polaritásával végezzük el, az eredmények feldolgozása során az áthallási hiba kiejthető. Meghatároztam, hogy a módszer a polaritásváltozásra nem érzékeny eszközöknél alkalmazható.

3.2. Polaritás váltás nélküli eljárást dolgoztam ki a négyzetes

transzfer karakterisztikájú eszközök tranziens mérése során az áthallás eliminálására. Az eljárás több, különböző gerjesztési szinttel végzett mérés felhasználásával választja szét a hasznos jelet és az áthallás összetevőt.

Tézishez kapcsolódó publikáció: [S5]

Tézisekhez nem kapcsolódó publikációk:
[S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12]

5. Eredmények hasznosítása

Annak ellenére, hogy a doktori kutatásaim során létrejött eredményeim speciális elektrotermikus mikrorendszerekre vonatkoznak, számos hasonló működési elvű mikrorendszer karakterizációja során felmerülő kérdésekre is válaszokat adhatnak. Disszertációm első felében karakterizált QTC elemek feltérképezése során sikerült feltárnom, hogy a hőmérsékletfüggő paraméterek milyen hatással vannak az adott építőelemekre. Ezek az eredményeim jól alkalmazhatóak olyan rendszerekben is, amelyek ugyanezeket az alapelemeket tartalmazzák. Meghatároztam, hogy a különböző Seebeck állandójú anyagok kontaktusain az átfolyó áram következtében létrejövő Peltier effektus jelentősen befolyásolhatja a hőmérséklet eloszlást. Ehhez kapcsolódóan megfogalmaztam olyan tervezési irányelveket, melyek segítségével elkerülhető az effektus hatása a működésre. Munkám másik fontos eleme, hogy a szerkezetet körülvevő gáz, mint működést befolyásoló tényező hatását részletesen feltárta, és a számítások során figyelembe vettem. A gáztér párhuzamos hőűtként való figyelembe vétele az analitikus számításokban eddig nem volt jellemző, de eredményeim alapján ez a szükséges korrekció lehetségessé válik, növelve a karakterizációs technikák pontosságát. A második tézisben tárgyalt modellezési technika szintén használható hasonló elven működő rendszerek modellezésére. A megalkotott helyettesítő kép teljes mértékben alkalmazható a modernebb áramkör szimulációs programokban, a fejlesztés azon

szakaszában, amikor már szükséges a megtervezett mikrorendszer és a környező elektronika együttes szimulációja.

Végezetül a munkám utolsó fejezetében bemutatott karakterizációs technikák egyrészt hatékony megoldásokat mutatnak be a kis időállandójú elektrotermikus MEMS-ek karakterizációjához, másrészt alapot adhatnak egyéb félvezető érzékelők, illetve mikroelektronikai elemek karakterizációs technikáinak finomításához, fejlesztéséhez.

Saját közlemények

- [S1] Péter Gábor Szabó, Vladimír Székely. Characterization and modeling of electro-thermal MEMS structures. *Microsystem Technologies*, 15(8):1293–1301, 2009.
- [S2] Péter G. Szabó, Vladimír Székely. Investigation of parallel heat flow path in electro-thermal microsystems. *Microsystem Technologies*, 17(8):533–541, 2011.
- [S3] P. G. Szabó, V. Székely. Characterization and Modeling of an Electro-thermal MEMS Structure. *Collection of Papers Presented at the Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS & MOEMS (DTIP'08)*, pages 350–354, 2008.
- [S4] Péter G. Szabó, Vladimír Székely. Investigation of Parallel Heat-flow Path in Electro-thermal Microsystems. *Collection of Papers Presented at the Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS & MOEMS (DTIP'10)*, pages 215–220, 2010.
- [S5] Péter G. Szabó, Vladimír Székely. Crosstalk Compensation in Thermal Transient Measurements. *Proceedings of the 16th International Workshop on THERMAL INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'10)*, pages 24–27, 2010.
- [S6] V. Székely, E. Kollár, G. Somlay, P. G. Szabó, M. Rencz. Design of a Static TIM Tester. *Journal of Electronic Packaging*, 132(1), 2010.

- [S7] V. Székely, G. Somlay, P. G. Szabó, M. Rencz. Design of a Static TIM Tester. *Proceedings of the 14th International Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Systems (THERMINIC'08)*, pages 132–136, 2008.
- [S8] M. Rencz, V. Székely, G. Somlay, P. Szabó, E. Kollár. A Sophisticated Method for Static Testing of TIM. *Proceedings of the ASME 2009 InterPACK Conference*, pages 1–7, 2009.
- [S9] Székely Vladimír, Kollár Ernő, Somlay Gergely, Szabó Péter Gábor, Juhász László, Rencz Márta, Vass-Várnai András. Statikus TIM teszter tervezése. *Híradástechnika*, LXVI(2011/1), 2011.
- [S10] V. Székely, P. G. Szabó. Blind tracing of mechanical movement in electrostatic MEMS structures. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2010.
- [S11] V. Székely, P. G. Szabó. Blind tracing of mechanical movement in electrostatic MEMS structures. *Collection of Papers Presented at the Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS & MOEMS (DTIP'10)*, pages 39–43, 2010.
- [S12] B. Németh, P. G. Szabó, V. Székely. Design, Simulation and Measurements of MEMS Test Structures. *Proceedings of the 6th Electronic Circuits and Systems Conference (ECS'07)*, pages 49–54, 2007.