



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Érintésmentes anyagvizsgálati és termikus mérések egyes problémái

**Ph.D. disszertáció
tézisfüzet**

**Ress Sándor
Budapest, 2006**

Bevezetés, előzmények

A BME Elektronikus Eszközök Tanszékén PhD hallgatóként majd tanársegédként eltöltött közel 10 év alatt egy sor kutatómunkába kapcsolódtam be, részint a technológiai laboratórium munkáihoz csatlakozva, részint a termikus mérésekkel és szimulációval foglalkozó csoport tevékenységéhez kapcsolódva. Jelen dolgozatomban azokat az eredményeket kívánom bemutatni, amelyeket a fenti tevékenység során elértem és az én megítélésem szerint tézis értékűek.

Nehézséget okozott számomra a dolgozat címének megválasztása. Érthető módon, mert eredményeim a Tanszék legkülönbözőbb kutatási területeihez, tevékenységi köreihez fűződően születtek, nehéz rájuk vonatkozóan közös címet találni. A munkáimat jellemző kulcsszavak: mikroelektronika, anyagvizsgálat, mérés technika, termikus. Ezekből állítottam össze (jobb híján) az alábbi címet:

„Érintésmentes anyagvizsgálati és termikus mérések egyes problémái”

Az értekezés rövid összefoglalása

Értekezésem első fejezetében egy fontos felületi mennyiség, a felületi kilépési munka különbség feltérképezésére adok eljárást. Bemutatom a felületi kilépési munka különbség mérésére szolgáló, számítógéppel vezérelt mérőrendszer felépítését.

A pontos felületi feltérképezéshez kisméretű referencia elektróda szükséges, azonban a kisméretű referencia elektróda alkalmazása esetén a jel/zaj viszony az elektróda átmérőjének méretének csökkentése miatt leromlik. Bemutatok egy új eljárást, amelyik egyrészt biztosítja azt, hogy a felületi pásztás során a referencia elektródát a felülettől minden mérési pontban azonos távolságban tartjuk, másrészt statisztikai módszerrel javítja a mérés pontosságát.

A második fejezetben röviden ismertetem valós fizikai rendszerek idő és frekvenciatartománybeli termikus leírásához és modellezéséhez szükséges elméleti ismereteket, amelyek a következő fejezetek megértéséhez elengedhetetlenül szükségesek. Bemutatom a valós fizikai rendszerek viselkedésének struktúrafüggvényen alapuló leírási módját, és ismertetem a struktúrafüggvény előállításához szükséges algoritmusokat. Ez a fejezet elméleti összefoglalót és háttéranyagot nyújt a 3. és a 4. fejezethez megértéséhez.

Értekezésem harmadik fejezete integrált áramköri tokok többkapus termikus modellezésével foglalkozik. A többkapus termikus modellezés segítségével jól használható, gyorsan számítható, úgynevezett kompakt modellekhez jutunk, amelyeket elektronikai rendszerek termikus tervezésénél használnak fel. A többkapus termikus modellezés a második fejezetben leírt algoritmusok kiterjesztésén alapul, azonban a modell paraméterek meghatározására az ott közölt algoritmusok közvetlenül nem alkalmasak.

Termikus kapunak tekintjük az áramköri tok minden olyan felületét, ahol hő keletkezhet, vagy távozhat. Bár a felületen a hőáram és a hőmérséklet eloszlás jellegzetes képet mutat, a gyakorlatban ezeket egy adott értékkel jellemezve gyorsan számítható, így a tervezésben közvetlenül, akár interaktívan felhasználható modelleket lehet alkotni, természetesen a pontosság csökkenése árán.

A kompakt modell paramétereinek meghatározása végesem szimuláció segítségével elvégezhető, amennyiben a struktúra geometriája és a struktúrát alkotó anyagok termikus tulajdonságai rendelkezésre állnak. Kívánatos lenne azonban, hogy ne csak szimulációval, hanem méréssel is meghatározzuk a modellparamétereket. A mérés során azonban szembesülnünk kell azzal a problémával, hogy a felületen definiált termikus kapu esetén nem, vagy csak nagy nehézségek árán tudunk megfelelő lezárást alkalmazni, hőáramot illetve hőmérsékletet mérni, ezért a mérés segítségével végzett modellgeneráláshoz új, méréstechnikailag megvalósítható utakat kellett keresnem.

Bemutatok egy eljárást, melynek segítségével a felületen definiált kapu, és az integrált áramköri chip közötti termikus transzfer impedancia meghatározható, a felületen történő infravörös érzékelővel végzett méréssel illetve a felület lézersugárral végzett gerjesztésével.

A negyedik fejezet szintén egy – a gyakorlatban jól használható – közelítő mennyiség, az integrált áramköri hordozó effektív hővezetési paramétereinek mérésével foglalkozik. A hőforrás (disszipáló alkatrész) közvetlen környezetében a pontos hőterjedés meglehetősen bonyolult, de az alkatrésztől távolabb, a termikus „távoltérben” a hőterjedés egy, a panelre jellemző *effektív hővezetési együtthatóval* és *effektív hőkapacitással* jó közelítéssel írható le.

Bemutatom az egy és kétoldalas nyomtatott huzalozású paneleken végzett szimulációs és mérési eredményeim, és eljárást adok az effektív hővezetési együttható struktúra függvényen alapuló meghatározására, valamint az effektív hővezetési tulajdonságok infravörös hőtérképezés segítségével történő meghatározására.

A ötödik fejezet némileg eltér az értekezés más fejezeteitől, mivel nem kisméretű szerkezetek, hanem ipari körülmények között végzett térbeli hőmérsékleteloszlás feltérképezéséről szól.

A mikrohullámú energiaközlés kivételes lehetőséget biztosít anyagok feldolgozására, mert az energiaközlés nem felületi, konvekciós úton, hanem térfogati gerjesztéssel történik. Ennek különös jelentősége a kis hővezetőképességű anyagok nagy tömegű feldolgozását iparágakban, például a gyógyszeriparban van. A mikrohullámú energiaközlés során a kezelt anyagban kialakuló elektromágneses tér eloszlása nem egyenletes. A feldolgozás során tehát hőmérsékletkülönbségek alakulnak ki, amelyek kis hővezetőképességű anyagok esetén a feldolgozás ideje alatt nem egyenlítődnek ki, a helyi hőmérsékletcsúcsok kialakulása pedig szélsőséges esetben visszafordíthatatlan károsodáshoz vezet.

Kidolgoztam egy vizsgálati módszert, amelynek segítségével lehetővé válik ipari mikrohullámú feldolgozás során a kezelt anyag térbeli közelítő hőmérséklet eloszlásának meghatározása. A térbeli közelítő hőmérséklet eloszlás ismerete megkönnyíti egyrészt a rendelkezésre álló anyagok kiválasztását, másrészt a biztonságos működési tartomány kijelölését.

Az értekezés új tudományos eredményei

T1. Tézis

Eljárást dolgoztam ki a kontakt potenciál különbség mérés (Kelvin mérés) pontosságának növelésére. Kimutattam, hogy a zajjal terhelt, mért hibajel effektív értéke az

$$y(x) = \sqrt{x^2 + a}$$

függvény szerint változik, ahol x arányos a felületi potenciál és a beiktatási feszültség különbségével. Erre támaszkodva, a felületi potenciál pontosabb megállapítását úgy végzem, hogy a felületi potenciál környezetében több pontban lemérem a beiktatási feszültség és a hibajel négyzet értékpárokat, majd ezekre parabolát illesztetek. A parabola talppontja kiadja a felületi potenciál pontosabb értékét.

Az eljárás jelentőségét az adja, hogy csökkenő referencia elektróda méret mellett a mérés jel/zaj viszonya is csökken, ennek ellenére statisztikai módszerekkel a felületi potenciál pontosan meghatározható.

T2. Tézis

Az integrált áramköri tokok termikus multiport modelljei egyes paramétereinek identifikálására dolgoztam ki olyan eljárásokat, amelyek segítségével a tok külseje felől látott termikus transzfer impedanciák meghatározhatók. Az eljárások:

- a) Gerjesztés a chipen, mérés a tokon infravörös termográfiaival.
- b) Külső gerjesztés lézersugárral, chip hőmérséklet mérés a chipen megvalósított hőmérsékletérzékeny elem segítségével.

Megállapítottam, hogy az eljárások segítségével a termikus impedancia függvény kisfrekvenciás szakasza a modell meghatározáshoz szükséges pontossággal számítható.

A tanszéki kutatócsoport korábban a chip gerjesztésével és hőmérsékletének mérésével kísérlete meg megállapítani a multiport modell admittancia mátrix elemeit, úgy, hogy a külső kapukon a mérés során különféle, ismert termikus ellenállású lezárásokat alkalmazott. Ezen az úton azonban a mátrix elemeknek csak egy része volt meghatározható. Kísérleteimben kimutattam, hogy a tok külső felületei alkotta kapukra lézersugaras gerjesztést alkalmazva és érintésmentes infravörös hőmérséklet mérést használva, további impedancia függvények mérhetők, amelyeket felhasználva, az $y_{BJ}(\omega)=y_{JB}(\omega)$, $y_{TJ}(\omega)=y_{JT}(\omega)$, $y_{TT}(\omega)$, $y_{BB}(\omega)$ mátrixelemek számolhatók. A gyakorlati pontossági problémák miatt az admittancia függvényeknek csak a kis frekvenciás szakasza számolható biztonsággal.

T3. Tézis

Szimuláció segítségével megállapítottam, hogy a struktúra függvény radiális hővezetési utat tartalmazó részére vonatkozó elméleti megállapítások a tranziens hőmérsékleti görbék feldolgozása során kapott struktúrafüggvényre is jól teljesülnek, a feldolgozás során alkalmazhatók. Módszert dolgoztam ki a mért struktúrafüggvény radiális hőterjedésnek megfelelő szakaszainak gyors kiértékelésére, az effektív hővezetési együttható meghatározására. Kísérleti módszert dolgoztam ki nyomtatott áramköri huzalozások effektív hővezetési tényezőjének és effektív diffúzivitásának lézersugaras gerjesztésen alapuló érintésmentes mérésére.

T4. Tézis

Eljárást dolgoztam ki ipari folyamatok (por és szemcsés anyag szárítása mikrohullámú energiaközléssel) során keletkező térbeli hőmérséklet inhomogenitás kimutatására.

Az eljárás lényege: a szárítandó anyagot szabályos közzel vízszintes teflon lapokkal részekre bontom. A szárítás végeztével a teflon lapokat sorra

kiemelve, infravörös kamerával rögzítem a rajta lévő porréteg hőmérséklet eloszlását.

Kimutattam, hogy az adott méretek mellett a kiemelés és az infravörös felvétel közötti idő alatt a teflon lemezen található anyag hőmérséklet eloszlása nem változik lényegesen. Kifejlesztettem a számítógépi programot, amely az infravörös képek sorozatából a szárítandó anyag egy háromdimenziós tartományának hőmérséklet értékeit meghatározza. Az eljárás segítségével kimutattam egy ipari mikrohullámú szárítógép kamrájában a mikrohullám teljesítményének nem egyenletes térbeli eloszlása által okozott hőmérsékleti csúcsokat.

Az eredmények hasznosítása

Valamennyi tézis gyakorlatban felmerült problémákra ad választ, így hasznosításuk egyértelmű.

Az első tézis eredményei közvetlenül felhasználhatók a felületi potenciál térkép síkbeli felbontásának javítására.

A második tézisben ismertetett eljárások az integrált áramköri tokok kompakt termikus modell paramétereinek meghatározására, és/vagy verifikálására alkalmasak.

A harmadik tézispontban ismertetett eredmények nyomtatott áramköri hordozók effektív hővezetési tulajdonságainak termikus tranziens mérésből, vagy érintésmentes, lézerrel történő gerjesztéssel és infravörös hőtérképezéssel történő mérésére alkalmasak. A tézispontban bemutatott elv alapján kifejlesztett eljárás a kereskedelmi forgalomban kapható T3Ster-Master termikus tranziens feldolgozó programcsomag része.

A negyedik tézisben bemutatott mérési technika alkalmas ipari mikrohullámú berendezésekben a „makroszkopikus” forró pontok lokalizációjára, azok kiterjedésének és hőmérsékletének mennyiségi értékelésére, így ennek segítségével egyrészt a biztonságos működési tartomány kijelölhető, másrészt kijelölhetőek azon kritikus térrészek, ahol az üzemi működés során a folyamat termikus megfigyelése a legcélszerűbb.

Az egyes tézisekhez kapcsolódó publikációk

T1. tézis

1. **S. Ress:** Mapping the surface potential distribution for olfactory images on asymmetrically heated substrates.
5th NEXUSPAN Workshop, Budapest, Hungary, 6-8 May 1998, pp. 96-99
2. **S. Ress:** Computer controlled Kelvin probe for olfactory images,
Electron Technology (Lengyelország), Vol. 33, No. 1-2, pp. 302-305, 2000
3. J. Mizsei, **S. Ress:** Chemical Images by an Artificial Olfactory Epithelia,
Sensors and Actuators B, Vol. 83, No.1-3, pp. 164-168, 2002

T2. tézis

1. V. Székely, **S. Ress**, A. Poppe, S. Török, D. Magyar, Zs. Benedek, K. Torki, B. Courtois, M. Rencz: New approaches in the transient thermal measurements,
Microelectronics Journal, Vol. 31, No. 9-10, pp. 727-733, 2000
2. **S. Ress**, E. Kollár: Comparison of various thermal transient measurements on a benchmark package,
6th THERMINIC Workshop, Budapest, Hungary, 24-27 September 2000, pp.120-122
3. V. Székely, **S. Ress**, A. Poppe, S. Török, D. Magyar, Zs. Benedek, K. Torki, B. Courtois, M. Rencz: Transient thermal measurements for dynamic package modeling: new approaches.
5th THERMINIC Workshop, Rome, Italy, October 3-6, 1999, pp. 7-11

T3. tézis

1. V. Székely, M. Rencz, S. Török, **S. Ress**: Calculating effective board thermal parameters from transient measurements, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* Vol.24, No. 4, pp. 605-610, 2001
2. V. Székely, M. Rencz, S. Török, **S. Ress**, B. Vízny: Experiments on effective board thermal conductivity measurements. *6th THERMINIC Workshop*, Budapest, Hungary, 24-27 September 2000, pp. 26-30
3. M. Rencz, A. Poppe, E. Kollár, **S. Ress**, V. Székely: Increasing the Accuracy of Structure Function Based Thermal Material Parameter Measurements, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* Vol.28, No. 1, pp. 51-57, 2005

T4. tézis

1. Á. Kelen, S. Ress, T. Nagy, E. Pallai and K. Pintye-Hódi: Mapping of temperature distribution in pharmaceutical microwave vacuum drying, *Powder Technology*, Vol. 162, No. 2, pp. 133-137, 2006
2. Á. Kelen, E. Pallai-Varsányi, **S. Ress**, T. Nagy, K. Pintye-Hódi: Practical method for choosing diluent that ensures the best temperature uniformity in the case of pharmaceutical microwave vacuum drying of a heat sensitive product
European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, Vol. 62, No. 1, pp. 133-137, 2006
3. Á. Kelen, **S. Ress**, T. Nagy, E. Pallai, K. Pintye-Hódi: Experimental indication of microwave distribution in 3D,
10th International Conference on Microwave and RF Heating, Modena, Italy, 12-15 September 2005, pp. 63-66
4. Kelen Á., **Ress S.**, Nagy T., Bódis A., Erős I. és Hódi Klára: Mikrohullámú vákuumszárítás során kialakuló hőeloszlás követésének lehetősége,
Acta Pharmaceutica Hungarica, 2005, 1, pp. 17-22.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Budapesti Műszaki Egyetem Elektronikus Eszközök Tanszékének minden dolgozójának, akik a dolgozathoz kapcsolódó mindennapi munkámban segítettek.

Elsőként szeretnék köszönetet mondani Dr. Rencz Mártának, Dr. Székely Vladimírnak, Dr. Farkas Gábornak, Dr. Mizsei Jánosnak és Dr. Poppe Andrásnak, akik a dolgozat létrejöttét hasznos tanácsaikkal segítették.

Az első fejezetben leírt munkám Dr. Mizsei János kutatómunkájához, kapcsolódott. A mérés technikai és az analóg áramkörökkel kapcsolatos problémáim megoldásában Ő és Dr. Török Sándor volt segítségemre.

A harmadik fejezetben leírt méréseket részben Kollár Ernővel közösen végeztük, az ő közreműködését is köszönöm.

A negyedik fejezetben leírt lézeres méréseket diplomatervezőmmel, Vízny Balázssal együtt végeztem. A lézerekkel kapcsolatos tudnivalókról és a teljesítmény lézer kezeléséhez Gordon Pétertől (BME Elektronikai Technológia Tanszék) kaptam segítséget, míg a szerelésben Dr. Török Sándor és Kaiser János volt segítségemre.

Az 5. fejezetben leírt méréseket a Richter Gedeon Rt.-ben végeztem, Kelen Ákos kutatómunkájához kapcsolódva. Köszönet illeti az ott dolgozó munkatársakat is, akik méréseinket segítették.