



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Termikus kérdések az elektronikában: mérés, modellezés, speciális eszközök

PhD értekezés téziséje

Készítette: Kollár Ernő

Témavezető: Dr. Székely Vladimír, MTA rendes tagja

Elektronikus Eszközök Tanszéke

Budapest, 2013.

Termikus kérdések az elektronikában: mérés, modellezés, speciális eszközök

PhD értekezés téziséje

Kollár Ernő, BME-EET, 2013.

8. **Kollár Ernő**: Izzólámpát sokat használunk, de vajon ismerjük-e?! (1. rész), Elektronet, 2007. május (XVI. Évfolyam 4. szám), pp. 14-16., (2. rész) 2007. szeptember (XVI. Évfolyam 5. szám), pp. 50-52.
9. P. Maák, T. Takács, A. Barócsi, **E. Kollár**, P. Richter: Thermal behavior of acousto-optic devices: effects of ultrasound absorption and transducer losses, submitted to Ultrasonics (2007)
10. Székely V, Török S, **Kollár E**: Improvements of the variable thermal resistance. In: Proceedings of the 13th International Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Microstructures (THERMINIC'07). Budapest, Magyarország, 2007.09.17-2007.09.19. (13)pp. 180-183.

BEVEZETÉS

Az elmúlt 12 évben folyamatosan részt vettem a Tanszékén végzett különféle, a félvezető eszközök termikus problémáihoz szorosan kapcsolódó kutatási és fejlesztési munkáiban, ami egyszerre segített, hogy széles és egyes esetekben mélyreható ismereteket szerezzek.

A kutatási területeim egy külső szemlélő számára látszólag távol állhatnak egymástól, azonban a felmerülő problémák és megoldásuk tekintetében szoros kapcsolatot mutatnak. Az értekezés címe inkább a kapcsolatot fedi fel, mintsem az egyes területeket: a nyomtatott huzalozású hordozók hővezetés vizsgálata, a hőáram eloszlás mérő tervezése és annak egyes alkalmazásai, valamint a szerves alapú világító dióda multi-fizikai vizsgálata.

A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI ÉS CÉLKITŰZÉSEI

Nyomtatott huzalozású hordozók hővezetés vizsgálatának korrekciói

Előzmény: Az elektronikus eszközök fokozatos integrációja mellett növekszik az alkatrészen belüli disszipáció sűrűség. A felesleges hőmennyiség elvezetésében egyre nagyobb szerepet játszik a lokális hőelvezetési út. Egyes elektronikus berendezések kialakításánál adott topológiai méreteken belül kell megoldást találni a hűtési problémára (lásd rack szekrények fiókjai), így nem egyszer magát a nyomtatott huzalozású hordozót használják fel hűtőbordaként. Azonban a hordozó lokális rétegstruktúrája és rajzolata hatással van a hőelvezetésre. A probléma bonyolultságából eredően zömmel csak termikus szimulátor programok segítségével kaphatunk pontos képet alkatrészek hőmérsékletéről. A vizsgálandó panel modellezése még az egyes környezeti hatások elhanyagolás és leegyszerűsítése mellett is hosszadalmas előkészületet és futási időt igényel. *Felmerült az igény egy gyorsabb, mérés technikára visszavezethető módszer kidolgozására.*

A Tanszéken az ezredforduló előtt kezdődtek meg a kísérleti mérések, a tranziens mérés-technikán alapuló érintéses és az érintésmentes hőveze-

tés mérési módszerek kidolgozására. Az előbbiben egy teljesítmény tranzistor biztosítja egyszerre a gerjesztést és az érzékelést, az utóbbiban pedig egy széndioxid lézer és egy infrakamera látja el ugyanezt a feladatot. Értekezésem az érintéses roncsolásmentes módszer szimulációs és mérési kísérletek eredményeit mutatja be.

Hőáram eloszlás vizsgálata félvezető eszközök hűtőfelületén

Hőáram mérésekor arra vagyunk kíváncsiak, hogy időegység alatt mekkora hőmennyiség halad át egy ismert felületen. Megvizsgálva a hőárammérő szenzorok alkalmazási területét, a legkülönbébb helyeken találkozhatunk velük. Az iparban a nagyvlasztók, bojlerok, kemencék vezérlő rendszereinek érzékelő elemei. Az ipari folyamatok hatékonyságát, biztonságát szavatolják, lehetővé teszik azok automatizálását. A mezőgazdaságban a növények evapo-transpirációjának (a talajfelszín és a növényzet együttes párologtatása) tanulmányozására használják. Az épületfizikában a falak hőszigetelésének vizsgálatára, a gyógyászatban egyes betegségek diagnosztizálására, a tűzvédelemben az épületfalak tűz- és hőállóságának vizsgálatára használatosak. Vannak továbbá az egészen különleges interdiszciplináris területhez sorolhat alkalmazások, mint például a védőruházat: hő- és tűzálló ruhák, hidegvízi búvárruhák, pilótaruhák, szkafanderek stb.

Ha az elektronikus eszközök, modulok és rendszerek termikus vizsgálataiban a hőáram ismeretére van szükségünk, akkor azt az anyagparaméterből, geometriából és a hőmérséklet-különbségből közvetett módon származtatjuk. Ez egy egyszerű struktúra esetén, mint amilyen a vákuumba helyezett, egyik végén fűtött, másik végén hűtött rézrúd esete (a hőmérsékleti sugárzás és a konvekció miatt nem teljesen egydimenziós a hőáram), nem tűnik túl bonyolultnak. Ellenben egy több száz kivezetéssel rendelkező mikroprocesszor hűtőfelületén áthaladó hőáram kiszámítása számítógépes szimulátor programot igényel.

A tézisekhez szorosan nem kapcsolódó publikációk

1. **Kollár Ernő**, Pohl László, Vízi Balázs: Többfunkciós termikus tesztáramkör, BME-TDK, 1999. november 21. , Budapest
2. S. Ress, **E. Kollár**: Comparison of Various Thermal Transient Measurements on a Benchmark Package, 6th THERMINIC Workshop, 24-27 September 2000, Budapest, Hungary, pp. 120-123.
3. M Rencz, V Székely, **E Kollár**: Measuring dynamic thermal multiport parameters of IC packages. In:Proceedings of the 6th International Workshop on THERMal INvestigations of ICs and Systems (THERMINIC'00). Budapest, Magyarország, 2000.09.24-2000.09.27. pp. 244-250.
4. **Kollár Ernő**: A Celeron 600 MHz-es processzor és hűtőbordájának vizsgálata termovíziós kamerával és termikus tranziensmérővel. HÍRADÁSTECHNIKA 58: pp. 27-31. (2003)
5. Farkas G, Poppe A, **Kollár E**, Stehouwer P: Dynamic Compact Models of Cooling Mounts for Fast Board Level Design. In: Proceedings of the 19th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'03). San Jose, Amerikai Egyesült Államok, 2003.03.11-2003.03.13. pp. 255-262.
6. Farkas G, Poppe A, **Kollár E**, Stehouwer P: Dynamic Compact Models of Cooling Mounts for Fast Board Level Design. In: Proceedings of the 19th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'03). San Jose, Amerikai Egyesült Államok, 2003.03.11-2003.03.13. pp. 255-262.
7. P. Maák, T. Takács, A. Barócsi, **E. Kollár**, V. Szekely, P. Richter: Refractive Index Nonuniformities in Acousto-optic Devices due to Heat Production by Ultrasound, Opt. Comm. 226, 419-425 (2006)

- C.15. A. Poppe, L. Pohl, **E. Kollár**, Zs. Kohári, H. Lifka, C. Tanase: Methodology for thermal and electrical characterization of large area OLEDs., In: Proceedings of the 25th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'09). San Jose, Amerikai Egyesült Államok, 2009.03.15-2009.03.19. pp. 38-44.
- C.16. A. Poppe, L. Pohl, **E. Kollár**, Zs. Kohári, H. Lifka, C. Tanase: Thermal and electrical characterization of large area OLEDs., In: Book of abstracts of the CIE Light and Lighting Conference with special emphasis on LEDs and Solid State Lighting. Budapest, Magyarország, 2009.05.27-2009.05.29. Budapest: pp. 220-226.
- C.17. László Pohl, **Ernő Kollár**, András Poppe: Nonlinear electro-thermal OLED model in SUNRED field simulator. In: Proceedings of the 16th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THEMINIC'10). Barcelona, Spanyolország, 2010.10.06-2010.10.08. pp. 149-153.
- C.18. László Pohl, **Ernő Kollár**: Extension of the SUNRED algorithm for electro-thermal simulation and its application in failure analysis of large area (organic) semiconductor devices. In: Proceedings of the 17th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THEMINIC'11). Paris, Franciaország, 2011.09.27-2011.09.29. pp. 195-200.

A szenzorgyártók által készített hőárammérő szenzorok közül azonban egyik sem alkalmas az általunk megjelölt feladatra, ezért *szükségessé vált egy újfajta hőárammérő szenzor megkonstruálása. Egy megfelelően konstruált szenzor segíthet a szimulátor programok és eszközmodellek pontosításában és érvényesítésében.*

A kutatást megelőzően a Tanszéken még nem készült hőárammérő eszköz. Az értekezés a feladathoz illeszkedő szenzor megalkotását, bemérését és egyes elektronikai alkalmazását mutatja be.

Szerves alapú világító diódák multi-fizikai vizsgálata

A kutatómunkát keretbe foglaló Fast2Light projektet fő célkitűzése egy olyan technológiai eljárás kidolgozása, aminek eredményeként egy *új, költséghatékony, nagy kihozatalú, roll-to-roll technológiájú, nagy felületre leválasztható, polimer-alapú fénykibocsátó fólia* jön létre. A projekt magába foglalja az összes OLED réteg rajzolatának és vastagságának tervezését, mérését, szimulációját és verifikálását. A projekt gazdasági célja, hogy megerősítse az európai világítástechnikai ipar vezető pozícióját az új technológiák és az új piaci lehetőségek révén. A keletkezett szellemi tulajdonnal, szabadalommal pedig védje saját piacát az ázsiai és az amerikai versenytársakkal szemben.

A kutatást megelőzően a Tanszék nem halmozott fel sem elméleti, sem gyakorlati ismereteket organikus félvezetőkkel kapcsolatban, azonban inorganikus LED-ek vizsgálatával kapcsolatban igen. Célunk volt a meglévő szerves LED-ek méréséhez specializált professzionális felszerelése segítségével *az organikus ismeretek Tanszéki meghonosítása.*

VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

Nyomatott huzalozású hordozók hővezetés vizsgálatának korrekciói

Megbecsültem a hordozók hővezetését az elemi rétegvastagságokkal súlyozott elemi hővezetések összegével. Módosított Bessel-függvényekre támaszkodó analitikus módszerrel megvizsgáltam, hogy az adott vastagságú gyenge hővezetésű homogén lemezek hőmérsékleti eloszlása miként változik a lemezt körülvevő levegő söntölő hatására. A levegő hatását a természetes konvekcióhoz tartozó hőátadási tényező (HTC) 6 ... 14 W/m²K közötti értékeivel vettem figyelembe.

A hordozókat a SunReD szukcesszív hálózat redukción alapuló, véges differencia módszert alkalmazó termikus mező megoldó program segítségével vizsgáltam. A hordozókon termikus DC és termikus tranziens szimulációt végeztem. A szimulációs eredményt részben a T3Ster-Master [] kiértékelő szoftver, részben a saját algoritmusom segítségével dolgoztam fel. A szimulációból nyert ún. integrális struktúrafüggvényekből meghatároztam, hogy mennyivel látszik a 0,026 W/mK hővezetési tényezőjű levegőben nagyobb hővezetésűnek a hordozó, mint a vákuumban.

A FloTHERM numerikus áramlási szimulátor programmal szimulációkat végeztem a hordozókra és a mérőszervekre vonatkozóan. Összehasonlítottam egymással a különböző szimulációs eljárás eredményeit.

Termikus tranziens mérést végeztem megmintázott és mintázatlan nyomtatott huzalozású hordozókon levegőben és vákuumban. A levegő hatását figyelembe véve korrekciós eljárás(ok)t készítettem és alkalmaztam. Összehasonlítottam az értékeket a szimulációs eredményekkel.

- C.8. **E. Kollár**, V. Székely, M. Ádám, M. Rencz: Heat-flux sensor array for package characterization, Proceedings of the 10th THERMINIC Workshop, 29 Sept-1. Oct 2004, Sophia Antipolis, France, pp. 37-42.
- C.9. Zs. Kohári, Gy. Bognár, **E. Kollár**, Gy. Horváth, A. Poppe, M. Rencz, V. Székely: Cross-verification of thermal characterisation of a micro-cooler, Collection of papers presented at the 11th THERMINIC Workshop, 28-30 September 2005, Belgirate, Lake Maggiore, Italy, pp. 263-264.
- C.10. M. Rencz, V. Székely, G. Somlay, P. Szabó, **E. Kollár**: A Sophisticated Method for Static Testing of TIM. In: Proceedings of the ASME 2009 InterPACK Conference. San Francisco, USA, 2009.07.19-2009.07.23. pp. 1-7. Paper IPACK2009-89363.
- C.11. László Pohl, **Ernő Kollár**, Zsolt Kohári, András Poppe: Electro-thermal investigation of OLEDs. In: Proceedings of the 14th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'08). Rome, Olaszország, 2008.09.24-2008.09.26. pp. 225-240.
- C.12. **E. Kollár**, I. Zólyomy, A. Poppe: Electro-thermal modeling of large-surface OLED, In: Tarik BOUROUINA, Bernard COURTOIS, Reza GHODSSI, Jean Michel KARAM, Aurelio SOMA, Hsiharng YANG (szerk.) Proceedings of the Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'09). Rome, Olaszország, 2009.04.01-2009.04.03. pp. 239-242.
- C.13. **Ernő Kollár**, Gusztáv Hantos: Electro-thermal modeling of different LEP-thickness white OLEDs. In: Proceedings of the 15th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'09). Leuven, Belgium, 2009.10.07-2009.10.09. pp. 121-123.
- C.14. A. Poppe, L. Pohl, **E. Kollár**, Zs. Kohári, H. Lifka, C. Tanase: Methodology for thermal and electrical characterization of large area OLEDs., LED PROFESSIONAL REVIEW *(13) pp. 15-20. (2009)

Konferenciatick folyóiratban

- C.1. M. Rencz, **E. Kollár**, A. Poppe, S. Röss: Evaluation issues of thermal measurements based on the structure function, 9th THERMINIC Workshop, Aix-en-Provence, France, 24-26 September 2003, pp. 219-224.
- C.2. M. Rencz, A. Poppe, **E. Kollár**, S. Röss, V. Székely, B. Courtois: Increasing the accuracy of structure function based evaluation of thermal transient measurements, Proceedings of IThERM 2004, June 1-4, Las Vegas, NV, USA, pp 85-90.
- C.3. M. Rencz, A. Poppe, **E. Kollár**, S. Röss, V. Székely, B. Courtois: A procedure to correct the error in the structure function based thermal measuring methods, Proceedings of the XXth SEMI-THERM Symposium, March 9-11, 2004, San Jose, CA, USA, pp 92-98.
- C.4. **E. Kollár**, V. Székely: Reducing the possibility of subjective error in the determination of the structure-function-based effective thermal conductivity of PCBs, 12th International Workshop on THERMAL INVESTIGATIONS of ICs and SYSTEMS 27-29 September 2006, Nice, Côte d'Azur, France, pp 28-32.
- C.5. V. Székely, M. Rencz, **E. Kollár**, J. Mizsei: Heat-flux sensor for the thermal measurement of IC packages, 8th THERMINIC Workshop, Madrid, 1-4 Oct. 2002, pp. 83-88.
- C.6. **Ernő Kollár**: 3x3 heat-flux sensor array for the thermal measurement of IC packages, 26th International Spring Seminar on Electronics Technology, Stará Lesná, Slovak Republic, 8-11 May 2003, pp. 133-136.
- C.7. **E. Kollár**, V. Székely, M. Ádám, M. Rencz: Integrated heat-flux sensor array for the thermal investigation on IC packages, Technical Digest of Eurosensors XVIII (18th European Conference on Solid-State Sensors), Rome 12-15 September 2004, pp. 758-759.

Hőáram eloszlás vizsgálata félvezető eszközök hűtőfelületén

Megbecsültem az Al-Si-Al szendvics struktúrájú, 100 mm² aktív felületű hőárammérő szenzor érzékenységét és a határfrekvenciát a tervezett üzemeletetési hőmérséklet tartomány alsó és felső határán. Bemértem az elkészített 100 mm² aktív felületű kísérleti hőárammérő szenzort. 3 × 3 mátrix elrendezésű kísérletként szenzort terveztem és készítettem, hogy megvizsgáljam lehetséges-e egy teljesítményeszköz hűtőfelülete és hűtőszerezvénye között a hőáram síkbeli eloszlását feltérpezni. A szerzett tapasztalatok alapján egy 6×7 cellás szenzort terveztem, amit elkészítettem és bemértem.

Elektronikai alkalmazási példákon keresztül demonstráltam a szenzor működését. A termikus tranziens mérés technika segítségével tranziens hőáram térképeket készítettem.

Felismertem, hogy a szenzorcellák ohmos ellenállása hőmérsékletfüggő, így hőmérsékleti térkép felvételére is alkalmas a szenzor. Bemutattam, hogy az összetartozó hőáram- és hőmérséklet térképek felhasználásával a szenzorcellák hőmérsékletének különbségéből származó érzékenységkülönbség korrigálható.

A statikus TIM (Thermal Interface Material) teszterhez terveztem egy 2×1 elrendezésű, kombinált hőáram és hőmérsékletmérőt.

Alkalmazási példákon keresztül igazoltam a hőáram eloszlás mérés mikroelektronikai létjogosultságát.

Szerves alapú világító diódák multi-fizikai vizsgálata

Világítástechnikai céllal tervezett szerves alapú világító diódákat tanulmányoztam a teljesítmény LED-ek termikus és optikai karakterizációjához készített TeraLED mérőrendszerrel. Az OLED mintákat multi-fizikai vizsgálat alá vettem. Egyszerre tanulmányoztam az áram, a feszültség, hőmérséklet, a radiometriai és optikai teljesítmények, valamint a fény kibocsátó réteg vastagság hatását. A mérési adatokból eszközmodelleket készítettem mind a nyitó-, mind a záró irányú tartományra, működésüket a SunReD

mezőmegoldó programmal ellenőriztem, a mérési eredményekkel összevettem.

Az OLED felületén kialakuló pontszerű hibákat tanulmányoztam mind az optikai, mind az infravörös tartományban. A hibahelyekre áramköri modellt készítettem, amit a mérési eredményekkel összevettem.

Hosszúidejű vizsgálatokat végeztem. Megállapítottam, hogy a használt eszközre is alkalmazható a korábban már elkészített modellem, a modellparaméterek időbeli változásában korreláció van. Összehasonlítottam a különböző laterális méretű OLED struktúrákat.

Becslést végeztem, amiből megállapítottam, hogy a projektben szereplő OLED struktúra szerves anyagainak hővezetés és hőkapacitás értékeit nem lehet a jelenlegi termikus tranzienst mérő időbeli felbontása mellett megmérni. Felületi potenciált mértem az OLED-eken. Megállapítottam, hogy az üveghordozó alatt lévő ITO réteg csökkenti a szerves réteg laterális irányú potenciálkülönbségét.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK (TÉZISEK)

T1.1. Megalkottam egy, a nyomtatott huzalozású hordozók lokális hővezetésérték meghatározását segítő, teljesítmény egységugrás hőmérsékleti válaszából származtatott ún. struktúra függvény kiértékelésén alapuló, a kiértékelés szubjektív hibát csökkentő algoritmust (λ -kereső algoritmust). Az algoritmus a diszkrét elemekből álló integrális struktúrafüggvény adott pontjának szimmetrikus szűk környezetének meredekség változását vizsgálja. A tartomány minden pontban meghatároztam a következő hővezetés-értékeket:

$$\lambda_n(R_{th}) = \frac{1}{4\pi \cdot w} \cdot \frac{\ln\left(\frac{C_{th(+n)}}{C_{th(-n)}}\right)}{R_{th(+n)} - R_{th(-n)}},$$

KÖZLEMÉNYEK

A tézisekhez kapcsolódó publikációk

Lektorált folyóiratcikkek

- J.1. 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 Technology, Vol. 28, NO.1, March 2005, pp. 51-57.
- J.2. M. Rencz, **E. Kollár**, V. Székely: Heat flux sensor to support transient thermal characterisation of IC packages, Sensors and Actuators, A. Physical, Vol. 116/2 pp 284-292, 2004.
- J.3. V. Székely, **E. Kollár**, G. Somlay, P. G. Szabó, M. Rencz: Design of a Static TIM Tester. JOURNAL OF ELECTRONIC PACKAGING 132:(1) 9 p. Paper 011001. (2010).
- J.4. Székely Vladimír, **Kollár Ernő**, Somlay Gergely, Szabó Péter Gábor, Juhász László, Rencz Márta, Vass-Várnai András: Statikus TIM teszter tervezése, HÍRADÁSTECHNIKA LXVI:(1) pp. 37-46. (2011)
- J.5. László Pohl, **Ernő Kollár**, András Poppe, Zsolt Kohári: Nonlinear electro-thermal modeling and field-simulation of OLEDs for lighting applications I: algorithmic fundamentals. MICROELECTRONICS JOURNAL 43: Paper Article in press. (2011)
- J.6. Zsolt Kohári, **Ernő Kollár**, László Pohl, András Poppe: Nonlinear electro-thermal modeling and field-simulation of OLEDs for lighting applications II: Luminosity and failure analysis. MICROELECTRONICS JOURNAL (2012) IF: [0.787**] (***) In Press(***)
- J.7. **Ernő Kollár**, László Pohl, András Poppe, Zsolt Kohári: Nonlinear electro-thermal and light output modeling and simulation of OLEDs. PERIODICA POLYTECHNICA-ELECTRICAL ENGINEERING (2011)

AZ EREDMÉNYEK GYAKORLATI ALKALMAZÁSA

T1. tézis csoport:

Lemezszerű anyagok radiális irányú hővezetés ismerete fontos a nagy disszipációjú alkatrészek közelében. A kutatási eredmények ennek méréshez, és a mérést terhelő hibák csökkentéséhez nyújt segítséget. Az eredmények felhasználhatók a mérőszerkezet adott hővezetési tartományhoz való optimalizálásához, valamint a mérést terhelő rendszeres hibák egy részének csökkentéséhez.

T2. tézis csoport:

A szenzor beépülésre került egy a termikus interfész anyagok termikus paramétereinek meghatározása fejlesztett mérőberendezésbe, ami a konvencionális TIM anyagok fajlagos hőellenállásánál kisebb fajlagos hőellenállású anyagok pontosabb vizsgálatát teszi lehetővé. Utóbbi anyagok különösen fontos szerepet töltenek be a nagy disszipációjú alkatrészek nagy disszipáció-sűrűségű felülete és a hűtőszerelvény között.

A mátrix elrendezésű szenzor kifejezetten a kutatás-fejlesztés területén használható: különleges eszközök termikus karakterizációjánál, dinamikus termikus kompakt modellezésnél, termikus modell verifikációnál.

T3. tézis csoport:

A közeljövőben a Tanszék tisztatéri laboratóriumában szerves félvezető eszközöket kívánunk előállítani. A mérésekből, a hosszúidejű vizsgálatokból és a meghibásodások vizsgálatából kollégáimmal együtt rengeteg tapasztalatot szereztünk OLED konstrukciós kérdésekben. Ez a további kutató-fejlesztő munkához nyújt segítséget. A szerves félvezetőkkal kapcsolatos gyakorlati ismereteinket oktatási órákban, illetve önálló tantárgy keretén belül szeretnénk átadni a hallgatóknak.

ahol w a lemez vastagsága, n pedig az R_{th} és C_{th} indexelésében a vizsgált ponttól n mintával a nagyobb értékek felé ($+n$) és n mintával a kisebb értékek felé ($-n$) lévő R_{th} és C_{th} értékeket jelenti ($n = 1...20$).

Meghatároztam a következő $\lambda_m(R_{th})$ átlagos lokális hővezetéseket és $\delta_m(R_{th})$ relatív szórásokat:

$$\bar{\lambda}_m(R_{th}) = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \lambda_n(R_{th}),$$

$$\delta_m(R_{th}) = \frac{1}{\bar{\lambda}_m(R_{th})} \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^m (\lambda_n(R_{th}) - \bar{\lambda}_m(R_{th}))^2}{(m-1)}},$$

ahol $m = 5, 10, 15, 20$.

Az a pont, ahol a $\delta_m(R_{th})$ függvények együtt a legkisebb minimumot adják, ahhoz a R_{th} ponthoz tartozó $\lambda_m(R_{th})$ érték adja az effektív hővezetést.

[C: 4]

T1.2. A termikus tranziens mérés technika segítségével korrekciós görbeseget készítettem a levegőben történő hővezetés méréséhez. Megállapítottam, hogy a nyomtatott huzalozású lemezek hővezetés mérésénél a levegő söntölő hatása korrigálható, a vákuumbeli mérés nem elengedhetetlen. Megállapítottam, hogy a termikus referencia szintet alkotó mérőgyűrű sugarának optimuma van. Analitikus módszerrel megállapítottam, hogy az adott vastagságú gyenge hővezetésű anyagok esetén a mérőgyűrű sugarát *felülről* a levegő söntölő hatása és a hőátadási tényező megbecsülésének bizonytalansága korlátozza. Korrekciós görbét készítettem a levegő söntölő hatása korrigálására. Mérés technikai korlátokból megállapítottam, hogy az adott vastagságú jó hővezetésű anyagok esetén a mérőkeret sugarát *alulról* a mérő szerkezet véges hőmérsékleti felbontása, a fűtőtranzisz-

torra adható maximális teljesítmény korlátozza. Méréstechnikailag igazoltam, hogy a fűtőtranszisztor tartója párhuzamos hőelvezetésként jelentkezik a mérőstruktúrában, hatása korrigálható a mérési kiértékelésekben. [J: 1, C:1-4]

T2.1. Megalkottam egy alumínium-szilícium termoelemes, három maszkos technológiával elkészíthető, újszerű hőáram eloszlás mérőt mikroelektronikai alkalmazásokhoz. A szenzor gradiens elven működik, p típusú szilícium lemezből van kialakítva, melynek két oldalán Si/Al kontaktusok termoelemeket alkotnak. Utóbbiak a két oldal hőmérsékletkülönbségét mérik, ami arányos a lemezen áthaladó hőárammal. Az egyik oldal alumínium kontaktusainak mátrix elrendezésével a szenzort alkalmassá tettem hőáram eloszlás mérésére. A szenzort kísérletileg megvalósítottam, 6×7 elrendezésű egyenként $2,5 \times 2,5$ mm felületű cellákból. A rajta végzett mérések valamint az elméleti számítások összevetésével 5°C és 95°C közötti hőmérséklet tartományban verifikáltam az eszközt. [J:2, C:5-9]

T2.2. Kísérletileg megvizsgáltam a hőárammérő szenzor hőáram érzékenységének hőmérsékletfüggését. A szilícium-alumínium kontaktusoknál $356\ \mu\text{m}$ szenzor vastagság és $6,25\ \text{mm}^2$ szenzorfelület mellett az alábbi eredményre jutottam:

$$\gamma_{\text{hőáram}}(T = 0^\circ\text{C}) = \left(500,6 + 1,287 \frac{1}{^\circ\text{C}} \right) \frac{\mu\text{V}}{\text{W}}$$

Hőáram érzékenységének hőmérsékletfüggése ($T = 0^\circ\text{C}$):

$$+0,002\ 57\ 1/^\circ\text{C} \pm 10\ \%$$

[J:2, C:5-9]

T2.3. Felismertem, hogy a szenzorcellák elektromos ellenállásának hőmérsékletfüggését felhasználva hőmérsékletet is mérhetünk az eszközzel. A

mátrix elrendezésű szenzor hőmérsékleti eloszlás felvételére is alkalmas. Megállapítottam a szenzorcellák elektromos ellenállásának hőmérsékletfüggését:

$$\gamma_{\text{elektromos_ellenállás}}(T = 0^\circ\text{C}) = +0,87 \frac{\%}{^\circ\text{C}} \pm 2\%$$

Bemutattam, hogy a hőmérsékleti eloszlás segítségével a szenzorcellák hőáram érzékenységének hőmérsékletfüggése korrigálható. [J:, C:6-8]

T2.4. Megterveztem egy kombinált hőáram/hőmérsékletmérő eszközt egy kísérleti TIM teszter részére. A szenzor a TIM teszter lényegi részét képezi. Egy szenzor páros segítségével a TIM anyagon előálló hőmérsékleti esés az eddigiéknél pontosabban mérhető. [J:3,4, C:10]

T3.1. Hőmérsékletfüggő OLED eszközmodellt készítettem, amelyben egyszerre szerepel az eszköz árama, feszültsége, hőmérséklete, sugárzott teljesítmény és fényáram, valamint a fény kibocsátó réteg vastagsága.

$$I(T, d_{LEP}) = \bar{T} \cdot \bar{B} \cdot \overline{d_{LEP}} \cdot U^{\bar{T} \cdot \bar{M} \cdot \overline{d_{LEP}}}$$

$$\Phi_E / \Phi_V(T, d_{LEP}) = \bar{T} \cdot \bar{M}_\Phi \cdot \overline{d_{LEP}} \cdot I + \bar{T} \cdot \bar{B}_\Phi \cdot \overline{d_{LEP}}$$

Adott OLED struktúrán méréstechnikailag meghatároztam a kvadratikus mátrixok elemeit. [J:5-7, C:11-18]

T3.2. Felismertem, hogy az OLED LEP rétegében megjelenő pontszerű hibák egy ellenállással modellezhetők. Bemutattam az eszköz viselkedését nagy impedanciás, kis impedanciás és közép impedanciás hibák esetén. A hiba körül kialakuló hőmérsékleti eloszlást infravörös kamerával kvantitatív módon, a fényintenzitás eloszlást digitális fényképezőgép segítségével kvalitatív módon verifikáltam. [J: 5, 6,7, C:11-18]