



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
Villamosmérnök és Informatikai kar  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

---

Dr. Bognár György, Ender Ferenc, Dr. Szabó Péter

## Termikus labor bevezető

Segédlet a BMEVIEEA306 Mikroelektronika tárgy 2. méréséhez

Budapest, 2012. szeptember 19.

# Tartalomjegyzék

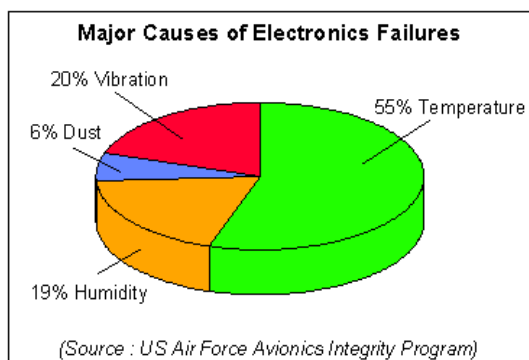
<b>I.</b>	<b>VLSI ÁRAMKÖRÖK TERMIKUS KÉRDÉSEI – HŐTRANSZFER A TOKON BELÜL</b>	<b>3</b>
1.	Bevezetés	3
2.	Modern VLSI áramkörök fogyasztáscsökkentési törekvései	5
3.	Termikus rendszerek leírása kompakt modellel – konduktív hőtranszfer	6
4.	VLSI áramkörök tokozási kérdései	7
5.	VLSI áramkörök hűtése és termikus karakterizációja	9
6.	Mérési feladat: VLSI áramkör tokozás termikus vizsgálata	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
<b>II.</b>	<b>ÉRINTÉSMENTES TERMIKUS KARAKTERIZÁCIÓ – HŐTRANSZFER A TOKON KÍVÜL</b>	<b>10</b>
1.	Bevezetés	10
2.	Hőátadás konvekcióval	11
3.	Hőátadás sugárzással, az érintésmentes hőmérsékletmérés és hőtérkép készítés lehetőségei	12
4.	Hőmérséklet-eloszlást érzékelő kártya	13
5.	Mérési feladat: Érintésmentes hőmérsékletérzékelő kártya vizsgálata	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
<b>III.</b>	<b>FELHASZNÁLT IRODALOM</b>	<b>16</b>

# I. VLSI áramkörök termikus kérdései – hőtranszfer a tokon belül

## 1. Bevezetés

A Moore törvénynek megfelelően az integrált áramkörökben másfél-, kétévente megduplázódik az egységnyi felületre integrálható tranzisztorok száma. Gordon Moore jóslata 1965-től (amikor még csak 64 tranzisztor volt integrálható egy félvezető felületén) mind a mai napig helytállónak bizonyult [1.1]. Az egyre nagyobb integráltsági fok csak úgy valósítható meg, hogy közben a csíkszélesség, a tranzisztorok csatornahosszúsága folyamatosan csökken. Jelenleg  $32\text{nm}^1$  CMOS technológiával készült processzorok  $1\text{cm}^2$  felületére kb. 300 millió tranzisztor integrálható. Az integráltság növekedése azonban nem csak a félvezetők felületén valósul meg, hanem térben is az ún. 3D tokozásoknak köszönhetően. Ez utóbbi esetben egy tokon belülre több félvezető lapka kerül, akár egymásra helyezve. Látható, hogy ebben az esetben az egységnyi felületre jutó disszipáció jelentősen megnövekedhet. Ez további, termikus szempontból is optimalizált áramkörtervezési megoldások (elektrotermikus szimuláció, termikus szempontú elrendező algoritmusok, stb.) alkalmazását, újfajta mérési és karakterizációs eljárások kidolgozását követeli meg egyben.

A fokozatosan növekvő egységnyi felületre eső disszipáció következtében keletkező hő legkisebb hőellenállású úton történő elszállítása, azaz az integrált áramkör hatékony hűtése kulcskérdéssé vált az elmúlt években. A(z) 1. ábrán látható az elektronikai berendezések termikus problémák miatti meghibásodásának aránya az összes meghibásodási fajtához viszonyítva. Ez a magas arány egyértelműen indokolja, hogy mért fontos foglalkozni az elektronikai és mikroelektronikai eszközök termikus kérdéseivel.



1. ábra – A fő meghibásodási okok elektronikai eszközökben

Processzorok, digitális jelfeldolgozó (DSP) áramkörök tervezésekor nagyon nagy figyelemmel kell lennünk a hőtechnikai tervezési szempontokra! Az integrált áramkörök túlmelegedése ugyanis hosszú, de akár rövidtávon is az áramkör tönkremeneteléhez vezethet. Példának okáért  $180..210\text{ }^\circ\text{C}$  feletti hőmérséklet esetén a hozzávezetések megolvadhatnak.

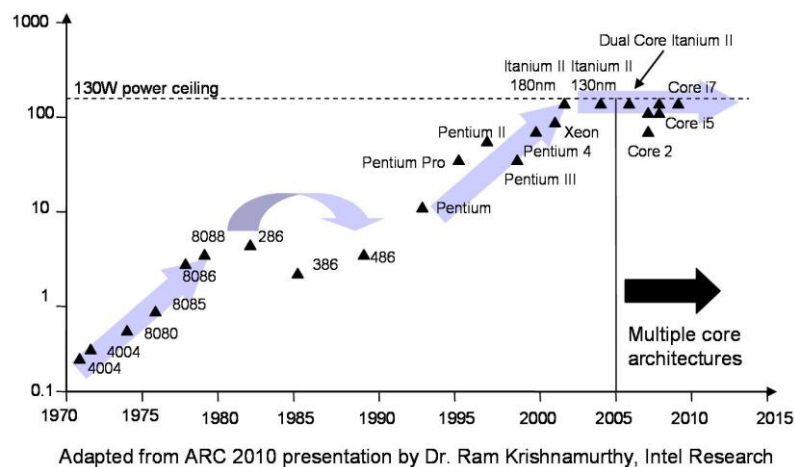
Elektromos szempontból a túl magas vagy éppen a túl alacsony hőmérséklet ( $100\text{ }^\circ\text{C}$  feletti, vagy  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  alatt) a munkapontok eltolódását, az egyes funkcionális blokkok késleltetéseinek megváltozását okozza, ami végső soron megghiúsíthatja az áramkör üzemszerű funkcionális működését.

---

<sup>1</sup> Egy Angström  $10^{-10}\text{m}$  (0.1nm) a hidrogén molekulában a két hidrogén atommag távolsága. A szilícium egykristályban a rácspontokat alkotó Si atomok közötti távolság (rácsállandó) kb. 0.5 nm. Tehát kb. 64 Si atom fér el a hosszában  $32\text{ nm}$  csatornahosszúságú MOS FET tranzisztor csatornája mentén!

A 2. ábrán látható a különböző félvezető technológián megvalósított Intel processzorok maximális disszipációja a gyártástechnológia függvényében [1.2]. A nagy processzorgyártó cégek körülbelül három évente jelennek meg a piacon egy-egy újabb processzorcsaláddal. Ezek az új processzorok az akkori legmodernebb technológián gyártódnak és kerülnek eladásra. Mindeközben, ha kidolgozásra kerül egy újabb félvezető technológia (kisebb csíkszélesség, nagyobb kihozatal, stb.), akkor a már gyártás alatt lévő processzorokat – architektúrális változtatás nélkül – elkezdik az új technológián gyártani. Mivel ugyanaz az áramkör egy kisebb csíkszélességű technológián kerül megvalósításra, így csökken a processzor fogyasztása. Így lehetséges például, hogy ugyanolyan architektúrájú, ugyanolyan sebességű Intel Pentium 4 processzorok különböző félvezető technológián megvalósítva csökkenő disszipációt mutattak. Például a 130 nm technológiájú Pentium 4 processzor disszipációja 81 W, míg az ugyanolyan felépítésű, de 90 nm megvalósított processzor disszipációja "csupán" 57 W. Tegyük hozzá, hogy a kisebb csíkszélesség miatt az adott architektúrájú processzor mérete csökken, ezzel nő a kihozatal.

Természetesen az új technológiára kidolgozott, új architektúrájú (párhuzamosított, több mag egy félvezetőn, hosszabb pipeline szál, nagyobb utasításkészlet, integrált memória és/vagy 3D videovezérlő stb.) processzorok számítási teljesítménye növekszik, de ezzel a fajlagos disszipációja is nő az előző processzorgenerációhoz viszonyítva. Történik ez annak ellenére, hogy a fogyasztás csökkentése érdekében számos technológiai újdonságnak számító lépést vezetnek be a tervezés és gyártás során (például hafnium alapú high-k anyagok alkalmazása a gate dielektrikumban, változó magfeszültség, SOI (Silicon on Insulator) technológia alkalmazása, változó (on-demand, Intel SpeedStep) órajelállítás, különböző standby üzemmódok kidolgozása, stb.).



2.ábra - Processzorok disszipációja az integrált áramkör gyártástechnológiája függvényében

Összefoglalva tehát úgy fogalmazhatunk, hogy a folyamatosan növekvő számítási teljesítmény és a gyártástechnológiai csíkszélesség csökkentésének együttes hatásaként az új generációs digitális áramkörök teljesítmény disszipációja fokozatosan növekvő tendenciát mutat. Ezt súlyosbíthatja a 3D tokozás és a több processzormag egy félvezető felületén való elhelyezése. Ezen okok miatt kiemelkedően fontos a termikus problémák megfelelő kezelése a mikroelektronikában már a tervezés fázisában is!

## 2. Modern VLSI áramkörök fogyasztáscsökkentési törekvései

A mai modern processzorok CMOS gyártástechnológián készülnek, és digitális blokkjaik és funkcionális egységeik CMOS kapcsolástechnikával kerülnek megvalósításra. CMOS digitális áramkörök fogyasztása négyzetesen függ a tápfeszültségtől és arányos a működési frekvenciával és a  $C_L$  kapacitás értékkel (ennek jelentésére később visszatérünk):  $P = C_L \cdot f \cdot U_{core}^2$ . Így látható, hogyha ezt a két értéket csökkentjük, akkor jelentős energia megtakarítást érhetünk el. Ezzel természetesen egyidejűleg növekszik a funkcionális blokkok késleltetése, így tehát lassul a processzor működése is, de ebből az átlag felhasználó irodai alkalmazások használatakor nem vesz észre semmit.

A modern digitális integrált áramkörök (processzorok, jelfeldolgozó áramkörök) néhány  $\text{cm}^2$  félvezető felületen disszipálnak 10...100 W teljesítményt. A processzorok adatlapján található TDP értéke a különböző kereskedelmi programok használata során fellépő maximális pillanatnyi teljesítményfelvételek átlagát jelenti, ami a processzor valóságos maximális teljesítményfelvételénél általában kb. 20 %...30 %-al kisebb. Ez az érték irányadással szolgál a processzor-hűtőrendszereket tervező és gyártó cégeknek. Intel Core i7 esetén ez az érték 130 W, tehát a maximális teljesítményfelvétele a processzornak akár 170 W is lehet. Tekintve, hogy például egy modern processzor<sup>2</sup> maximális magfeszültsége (*core voltage*) 1,3 V körüli, a TDP (*Thermal Design Power*) értéke pedig 130 W, adódik, hogy az integrált áramkör maximális pillanatnyi áramfelvétele kb. 100 A is lehet! Nyilvánvaló, hogy ekkora áramot egy pár  $\text{cm}^2$  felületű félvezető darabba nem egy „vezetékkel” juttatnak be!

Fogyasztás csökkentése érdekében (így a hőmérséklet csökkentése érdekében is) a processzortervező és gyártó cégek számos újszerű megoldást mutattak be. Ennek egyik példája a működési frekvencia és a magfeszültség menet közbeni dinamikus változtatása (*Intel Enhanced Speed Step Technology*  $V_{core}=0.8...1,375$  V). Megfigyelték ugyanis, hogy alapszintű (főleg irodai) alkalmazások során a processzor terhelése kb. 10 % körül alakul és egy átlag felhasználó csak nagyon ritkán használja ki a processzor teljes erőforrását (tipikusan játékok, hang/videó szerkesztés, konvertálás és CAD szimulációk esetén terheljük a processzort 100%-ban).

A fogyasztáscsökkentés másik módja a gyártástechnológia megváltoztatása, fejlesztése. A CMOS áramkörök esetén a  $C_L$  értéke a kimenetet terhelő kapacitások összességéből tevődik össze: a következő kapu(k) bemeneti kapacitása(i) és a hozzávezető vezetékek szórt kapacitásai. A  $C_L$  érték csökkentésére a csökkenő csíkszélesség<sup>3</sup> kínál megoldást. Az ezredfordulón még a 180...250nm csíkszélességű technológiák voltak elterjedve, manapság már 32nm csíkszélességű technológián valósítanak meg processzorokat. A csíkszélesség fokozatos csökkentésével azonban újabb és újabb problémák léptek és lépnek fel. Például a szivárgó áram csökkentésére új gate dielektrikumot (ún. hafnium alapú high-K anyagot) kellett választani, illetve visszatértek a fém alapú gate elektródák használatához.

Multi- $V_T$  technika is széles körben elterjedt fogyasztáscsökkentési módszer, amelynek célja a küszöbalatti áram csökkentése. Az elv az ún. bulk effektus (vagy más néven szubsztrát visszahatás) jelenségén alapul. Ha egy MOS FET tranzisztor bulk elektródájának feszültségét megváltoztatjuk, akkor változik a küszöbfeszültség ( $V_{Th}$  – threshold voltage) értéke. A küszöbalatti áram nagysága pedig exponenciálisan függ a  $V_{Th}$  értékétől: növekvő  $V_{Th}$  feszültséghez, exponenciálisan kisebb a

<sup>2</sup> A továbbiakban az Intel Core i7 Extreme Edition I7-980X processzor tulajdonságait tekintjük át

<sup>3</sup> A legkisebb technológiailag megvalósítható méret (*Minimal Feature Size*). CMOS technológián a vezérlőelektróda (Gate) alatti csatorna hossza (L).

küszöbalatti áram érték társul! Sajnos a bulk feszültség ilyen irányú megváltoztatásával a source-bulk és drain-bulk közötti diódák szivárgási árama növekszik. Erre kínál megoldást a SOI (Silicon on Insulator) technológia.

### 3. Termikus rendszerek leírása kompakt modellel – konduktív hőtranszfer

Integrált áramkörök tervezése során törekedni kell arra, hogy az egyes alkatrészek (*tranzisztor aktív zónája, ellenállás*) disszipálódó teljesítménye miatt ne melegedjen túl a chip. Ezért gondosan meg kell tervezni a tok hőátadását, tartani kell a különböző anyagokra megengedhető üzemi hőmérséklettartományt.

A hőátadás jellemzésére a **hővezetési ellenállást** (*hőellenállás, thermal resistance*) használjuk. Ha egy hővezető "hasáb" két vége között  $\Delta T = T_H - T_C$  hőmérséklet különbség van, és ennek hatására  $P$  hőteljesítmény (*disszipálódó teljesítmény*) áramlik át rajta, akkor a hőellenállás

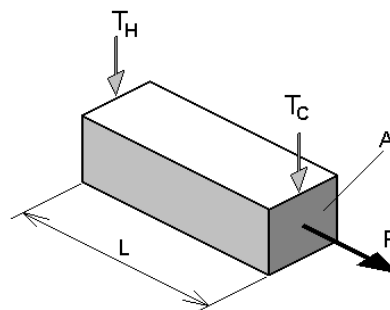
$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P} \quad (1)$$

A hővezetési ellenállás mértékegysége K/W. Értékét a hővezető közeg geometriája és fajlagos hővezetési együtthatója határozza meg:

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda} \frac{L}{A} \quad , \quad (2)$$

- ahol  $A$  a hővezetési szakasz keresztmetszete,  $L$  a hosszúsága.

Figyeljük meg a nyilvánvaló analógiát az elektromos vezetéssel!



3. ábra A hőellenállás magyarázatához

A hőtárolás jellemzésére a **hőkapacitás** (*heat capacitance*) fogalmát használjuk. Ha egy test hőmérsékletének  $\Delta T$ -vel való emeléséhez  $W$  hőenergia szükséges, akkor a hőkapacitás

$$C_{th} = \frac{W}{\Delta T} \quad (3)$$

A hőkapacitás mértékegysége Ws/K. Értékét a hővezető közeg geometriája és fajlagos hőkapacitása határozza meg:

$$C_{th} = c_v \cdot A \cdot L \quad (4)$$

Egy félvezető eszköz egyszerű termikus jellemzésére a környezet felé mutatott hőellenállását és a hőkapacitását adhatjuk meg. A kettő szorzata az eszköz **termikus időállandója**:

$$\tau_{th} = R_{th} \cdot C_{th} \quad (5)$$

A félvezető eszköz és környezete közötti hőátadás jósága két tényezőn múlik, ennek megfelelően a hőellenállást két részre bonthatjuk:

1. az eszköz aktív (*hőtermelő*) zóna és az eszköztok közötti belső hőellenállás (*tokkonstrukció*) –  $R_{thjc}$  (*junction-case*)

2. az eszköztok és a környezet közötti hőátadás (*javítása érdekében hűtő szerelvény – méret, nagyság, bordázat, forszírozott légáram...*) –  $R_{thca}$  (*case-ambient*)

$R_{thjc}$  általában jóval kisebb, mint  $R_{thca}$ .

A félvezető eszközök belső hőátadása szinte mindig **hővezetéssel** történik.

A hűtő szerelvénynek hővezetéssel adja át az eszköztok a hőt, abban (pl. egy hűtőszárnyban) vezetéssel terjed tovább, majd annak felületét természetes vagy mesterséges folyadék/légáramlás hűti (*konvekció*).

Az eszköz belső hőmérsékletét ( $T_j$ ) a környezet hőmérséklete és a disszipált teljesítmény határozza meg:

$$T_j = T_a + P \cdot (R_{thjc} + R_{thca}) \quad (6)$$

Az integrált áramköröknél az IC alkatrészei eltérő mértékben disszipálnak, azaz a chip felületi hőmérséklet-eloszlása nem egyenletes. (*A felület disszipáló elemekkel való átlagos kitöltése általában maximum 20-30%-os.*) A kialakuló hőmérséklet- és hőáram eloszlás vizsgálatára alkalmasak a termikus szimulációs programok.

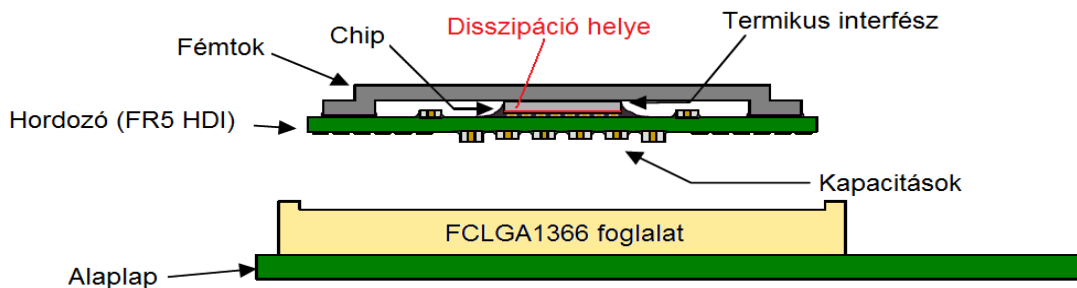
A hővezetési ellenállás ismerete csak stacionárius esetben elegendő a melegedés számításához.

Időfüggő igénybevételnél (*egységugrás, periodikusan ismétlődő, szinuszos jelek*) számolni kell azzal a ténnyel, hogy az eszköz véges **hőkapacitása** miatt a felmelegedés nem követi azonnal a hőtermelést. Ha az igénybevétel rövid idejű (*a struktúra termikus időállandójához képest*), akkor a belső hőmérséklet nem feltétlenül megy a maximálisan megengedhető érték fölé, még akkor sem, ha a stacionáriusan megengedettnek sokszorososa az igénybevétel.

#### 4. VLSI áramkörök tokozási kérdései

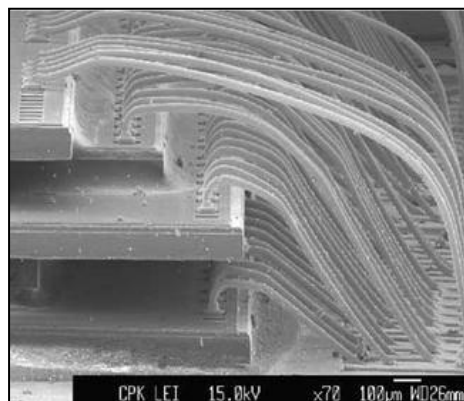
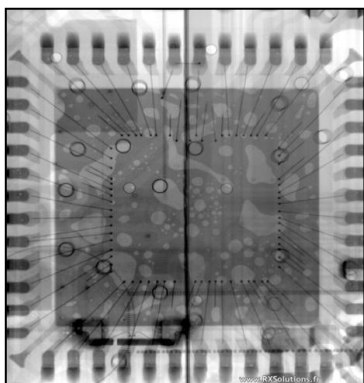
Félvezető eszközök egyre növekvő fogyasztása következtében a disszipált hő elvezetése magáról a félvezető felületéről, és így magának a hőátadás jóságának a minősége a félvezető és a környezete között központi kérdéssé vált. A félvezető eszközök belső hőátadása szinte kizárólag hővezetéssel történik. Így nagyon fontos, hogy a hőt minél gyorsabban, a lehető legkisebb hőellenállású úton sikerüljön elvezetni, mert ellenkező esetben a megnövekedett hőmérséklet a félvezető eszköz túlmelegedéséhez, esetleges meghibásodásához vagy legrosszabb esetben leégéséhez vezethet. Ezért is nagyon fontos a tervezés során és a már meglévő, legyártott eszközökben is a hővezetési utak pontos feltérképezése, vizsgálata.

Félvezető eszközök kiserelése során, még a tokozás előtt az eszközt általában kovarból készült tartólemezre (*leadframe*) rögzítik fel (ez a művelet a *die-attach*) (6. ábra), majd a kivezetését aranyhuzallal (kb. 90µm vastagságú) a tok lábaihoz kötik.



4. ábra – Modern processzorok tokozási technológiája (<http://www.intel.com>)

A modern tokozási és szerelési technológiáknál azonban (4. ábra) a tokozott integrált áramkörök „fejjel lefelé” kerülnek a foglalatba és a félvezető aktív felülete van a foglalat felé. A félvezető szubsztrátja felfelé néz, annak érdekében, hogy ide lehessen illeszteni különböző passzív és aktív hűtőeszközöket. Látható azonban, hogy a hővezetés minősége nemcsak a tokozás és a hűtőszerkezet közötti hőátadástól ( $R_{thca}$ ), hanem a félvezető felülete és a fémtek közötti hőellenállástól is jelentősen függ ( $R_{thjc}$ ). [1.3] Mivel a disszipált hőt a lehető legkisebb hőellenállású úton kell elvezetni, ezért nagyon fontos ennek a felrögzítésnek a minősége, hiszen az áramköri tok ilyen kialakítása mellett a fémteken keresztül futó hőút biztosítja a legkisebb hőellenállást. Ha felrögzítés során légbuborék kerül a félvezető és a tartólemez közé (5. ábra), vagy a két felület között ún. rétegelválás (delaminálódás) következik be, akkor a hőellenállás oly mértékben megnőhet, hogy az így megnövekedő üzemi hőmérséklet akár az eszköz meghibásodásához is vezethet.

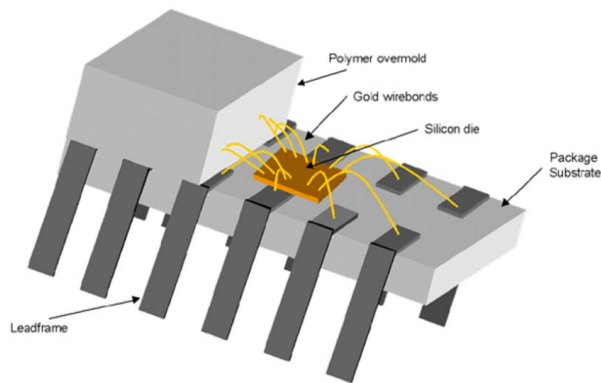


5. ábra – (a) légbuborékok a felrögzítésben (b) multichip tokozott struktúra (<http://www.rxsolutions.fr>)

Különösen kellemetlen ez a probléma az ún. 3D multichip tokozás vagy stacked-die struktúra esetén [1.4]. Ennek egyik módja „vertikális” multichip tokozás, amikor is a lapkákat egymásra ragasztják a kivezetések kényelmes bekötése céljából lépcsősen csökkenő lapkaméretet alkalmazva (piramis szerkezet) (5. ábra). Ebben az esetben a félvezető lapkák közötti hőátadás minősége központi kérdéssé válik.

Modern kivezetési és tokozási technológiáknál (pl.: flip-chip, FCBGA tokozás lásd. 4. ábra) a fő hővezetési út kiegészül egy parallel ággal: hővezetés a félvezető felületétől az interposer rétegen (pl.: FR5 HDI vagy Through-Silicon-Via hordozó) és a forraszgolyókon (*bump*) át az alaplap felé.





6. ábra – Félvezető eszköz elhelyezkedése egy DIL tokban  
 (<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9903/Frear-9903.html>)

## 5. VLSI áramkörök hűtése és termikus karakterizációja

Termikus karakterizációs eljárás során a hővezetési út tulajdonságait határozzuk meg mérésekkel és szimulációkkal. Az eljárással megvizsgálható, hogy a felrögzítésbe nem került-e légbuborék, illetve nem történt-e rétegelválás. Egy ilyen rétegszerkezeti eltérés megnövekedett hőellenállást okoz a hővezetési útban. Felvetődik a kérdés, hogy miként tudnánk kideríteni, hogy a szerkezeten belül hol történtek ezek az eltérések. A tokozás szerkezetének minden rétege (pl. chip, lead frame, TIM anyag, kerámia, hűtőborda stb...) jellemezhető egy hőellenállás-hőkapacitás párossal ( $R_{th}$ ,  $C_{th}$ ). Tehát nem a teljes rendszer környezet felé mutatott hőellenállására vagyunk kíváncsiak ( $R_{thca} + R_{thcj}$ ), hanem ezekre a parciális hőellenállás-hőkapacitás értékekre, hiszen ebből egyértelműen látszik, hogy a hővezetési út melyik részén (melyik rétegek határán) növekedett meg a hőellenállás. Erre kínál megoldást az Elektronikus Eszközök Tanszékén kidolgozott ún. Termikus Tranzienstesztelés elve és módszere.

Fontos megjegyezni a processzorok növekvő disszipációja mellett, a jelenleg alkalmazott hűtőeszközök kezdik elérni a hűtőtéljesítményük maximumát, ezért az új típusú hűtőeszközök kifejlesztése iránti igény megnövekedett [1.5][1.6]. Egyes irodalmi források szerint a lehetséges megoldás a mikroméretű hűtőeszközökben keresendő [1.7]. Ennek egyik megvalósítása az integrált áramkörök hordozójában kialakított mikroméretű csatornák hálózata, melyben folyadékot keringetve igen jó hatásfokú hűtőrendszert lehetne kifejleszteni. Az elgondolás alapja az, hogy igazából a kb. 150...200  $\mu\text{m}$  vastag szilícium hordozónak csak a felső 1..2 %-át használjuk az áramköri funkció megvalósítására, azaz a félvezető eszközök létrehozására. Az alsó kb. 98% szinte teljesen kihasználatlan marad (eltekintve egyes MEMS eszközökkel egybeintegrált megoldásoktól). Egyes nagyfrekvenciás alkalmazásokban ráadásul ezt az ún. aktív réteget egy szigetelő választja el a hordozó többi részétől (SOI – Silicon on insulator technika), ezáltal teljesen különválasztva ezt a két tartományt. Egyelőre azonban problémás ezen csatornák MEMS technológiával való kialakításának a CMOS gyártási technológiával való összeillesztése.

## II. Érintésmentes termikus karakterizáció – hőtranszfer a tokon kívül

### 1. Bevezetés

Elektronikai berendezések belsejében uralkodó hőmérsékleti, hőeloszlási viszonyok működés közben történő feltérképezése egyre fontosabb feladattá válik. Az elektronikai eszközökben alkalmazott tokozott integrált áramkörök – digitális processzorok, jelfeldolgozó áramkörök, nagy teljesítményű erősítők, nagyfeszültségű kapcsoló elektronikák, stb. – egyre nagyobb disszipáció sűrűsége miatt szükségessé válik már a tervezés fázisában – mind rendszerszinten, mind áramkör szinten – a termikus problémák kezelése. Az áramkörön található félvezető eszközök, alkatrészek működési paramétereit nem csak a technológiai szórások, hanem az áramkör aktuális hőmérséklete is befolyásolja. Ennek figyelembevételével születtek elektrotermikus szimulációs eszközök és különböző a hőmérsékleti eloszlásokat, az aktív illetve passzív hűtőeszközök hatásait szimulálni képes programok, melyek segítségével a tervező az áramkör valóságosabb működését tudja ellenőrizni még a gyártás előtt.

A különböző elektrotermikus szimulációs eszközök és modellek [II.1][II.3] alkalmazásával az esetek zömében jó közelítést kapunk az áramkör későbbi működéséről. Azonban egy-egy áramkör szimulációja – főleg elektrotermikus szimulációja – akár több órát is igénybe vehet. Ráadásul ha bármilyen paraméteren – elrendezés, hordozóanyag, disszipáció, stb. – változtatunk, a szimulációt meg kell ismételni. Nagyon fontos kérdés, hogy a szimulációban alkalmazott modellek valóban jól közelítik e valóságot? A szimulációs eredmények ellenőrzéséhez illetve a szimulációban alkalmazott modellek előállításához mindenképp ellenőrző és karakterizáló mérésekre van szükség.

A kész áramkörök (integrált áramkörök, áramköri kártyák) tesztelése többnyire valamilyen tesztáramkörben esetleg tesztberendezésben történik. Előfordulhat azonban, hogy a tesztek alatt tökéletesen működő áramkör a valódi működési környezetébe helyezve mégis meghibásodik. Ekkor szükségessé válik a hiba pontos okának és helyének méréssel való feltárása, meghatározása. Nagy nehézséget jelent, hogy ha a méréseket az eredeti környezetben szeretnénk végrehajtani, akkor maga az általunk behelyezett mérőrendszer is módosítja a valóságos működési körülményeket. Például egy hőmérsékletérzékelő áramkör aktív eszközre való ráhelyezésével egy újabb paralel hővezetési utat viszünk a rendszerbe, aminek következtében az aktív eszköz működés közbeni hőmérséklete csökkenhet. A mérések sikeres elvégzésével lehetséges az áramkörök működési zavarait okozó kritikus részeket lokalizálni, így ezen részletek újratervezésével elérhető a hibamentes működés.

Rack szekrényekben, számítógépházakban az áramköri kártyák (pl.: PCI, AGP kártyák) hőmérsékleti térképének és a legmelegebb pont (ún. hot-spot) meghatározása és lokalizálása segítséget nyújthat az áramkör lehetséges hibahelyeinek meghatározására. Nagyon fontos, hogy ez érintésmentesen történjen. Az érintésmentes hőmérséklet érzékelés az áramköri kártyán található passzív– illetve aktív eszközök hőmérsékletével arányos intenzitású hőszugárzás érzékelésén alapszik.

Az érintésmentes hőmérséklet érzékelés egyik lehetséges módja az infrakamerás térképezés. A speciális kamera képfelvévő egysége a távoliinfravörös tartományba eső fotonokra érzékeny, így láthatóvá válik a testek hőkibocsátása. Működő rendszerben azonban a kártyák olyan szorosan helyezkednek el (20mm távolságban PCI aljzatok esetén), hogy oda hagyományos infrakamerával nem lehet belátni. Egy mérőrendszer tervezésekor ugyanakkor nagyon fontos döntési tényező a gazdasági szempont is, hiszen infrakamerák vagy különböző mikro-elektromechanikus eszközök (MEMS) alkalmazásával a mérőrendszer ára nagyon magas lenne.

## 2. Hőátadás konvekcióval

Konvektív hőátadásról beszélünk, amikor egy adott hőmennyiség átszállítása egyik helyről a másikra a közeg (valamely gáz vagy folyadék) mozgása által valósul meg. A konvektív hőtranszfer ma is használt elméletének alapjait *Prandtl* [II.1] fektette le. Megfigyelései szerint konvektív esetben maga a hőtranszfer csak a szilárd test közvetlen közelében, az úgynevezett termikus határrétegben folyik. Ez az eredmény tette először lehetővé a probléma gyakorlatban is használható matematikai modellezését. A konvekciós hőtranszfer két komponensből tevődik össze: először a szilárd testben tárolt hőmennyiség hődiffúzió (kondukciónak) útján kerül az áramló közegbe, és ott a magasabb energiaállapotba került molekulák mozgásával halad tovább. Ezt követően a szállított hőmennyiség ismét diffúzió útján kerül a környezetbe vagy a szilárd testbe.

A környezeti peremfeltételek függvényében a konvekció két fajtát különböztetjük el:

*Szabadkonvekció* esetén a hőszállító közeg áramlását a felhajtóerők okozzák, amit a közeg hőmérsékletváltozás következtében létrejövő sűrűségkülönbségei hoznak létre. A magasabb hőmérsékletű test feletti közeg felmelegszik, és a molekulák szabadúthossza megnő. Ezzel lokálisan csökken a közeg sűrűsége, és sűrűséggradiens jön létre. A rendszer igyekszik kiegyenlíteni a gradienst, így egy folyamatos áramlás indul a meleg test normális irányában. Tipikus példa egy radiátor felett kialakuló felfelé irányuló légáramlás.

*Kényszerkonvekció* esetén a hőszállító közeg egy külső erő hatására áramlik. Ezt a külső erőt például egy szivattyú, pompa, ventilátor hozza létre. Gondoljuk meg, hogy ebben az esetben a hőtranszfernek a közeg áramlása okozta összetevője a külső kényszerítő erő függvényében megnövelhető. Így kényszerkonvekcióval lényegesen nagyobb hőmennyiség szállítható el a meleg testtől, mint szabadkonvekció esetében.

A konvektív hőtranszfer matematikai leírása meglehetősen összetett feladat, mivel a legtöbb gyakorlati esetben az áramlási mező is csak analitikusan adható meg. A helyzetet tovább bonyolítja, hogy az áramló közeg hőmennyiség-felvevő képessége is távolságfüggő. Ha azonban a vizsgált geometria és az áramlás a rendszer egy adott keresztmetszetében állandónak tekinthető, az anyagjellemző paraméterek állandóak, valamint a test hőkapacitása elhanyagolható az áramló közeg hőkapacitásához képest, a probléma az úgynevezett *Newton féle hűlési törvénnyel* közelíthető az alábbi formában:

$$\frac{dQ}{dt} = h \cdot A(T_{env} - T(t)) \quad (7)$$

ahol  $Q[J]$  a hőmennyiség,  $h[W/(m^2K)]$  az áramló közeg és a test közti hőátadási tényező (amit ebben az esetben állandónak veszünk),  $A[m^2]$  a felület, ahol a hő áramlik,  $T_{env}[K]$  a környezeti hőmérséklet, ami szintén állandónak veszünk és  $T(t)$  a test felületén kialakuló időfüggő hőmérséklet.

A  $h$  hőtranszfer tényező távolságfüggésének gyakorlatban is használható elméletét *Reynolds* dolgozta ki. A precízebb vizsgálatnál természetesen azt is figyelembe kell venni, hogy az elszállított hő révén a környezet hőmérséklete növekszik.

### 3. Hőátadás sugárzással, az érintésmentes hőmérsékletmérés és hőterkép készítés lehetőségei

Induljunk ki a Planck-féle sugárzási törvényből, amely egy T hőmérsékletű, abszolút fekete test egységnyi felületéről, adott idő alatt kibocsátott  $\lambda$  hullámhosszúságú sugárzás energiáját adja meg:

$$E(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda}} - 1} \left[ \frac{W}{m^2} \cdot \mu m \right] \quad (8)$$

ahol  $h=6,6256 \cdot 10^{-34}$  [Js] a Planck állandó,  $k=1,38065 \cdot 10^{-23}$  [J/K] a Boltzmann állandó és  $c=3 \cdot 10^8$  [m/s] a fénysebesség. Az abszolút fekete test egy olyan hipotetikus test, amely minden ráeső sugárzást elnyel, és emisszió képessége valamennyi test közül a legnagyobb.

A Planck összefüggés hullámhossz szerinti integrálásával kapott összefüggés (Stefan–Boltzmann törvény) megadja a feketetest által *egységnyi idő* alatt, egységnyi felületen, valamennyi hullámhosszon kisugárzott összenergiát:

$$Q = \int_0^{\infty} E(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot T^4 \left[ \frac{W}{m^2} \right], \quad (9)$$

ahol  $\sigma=5,672 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup> a Stefan-Boltzmann állandó. Ha két  $A_1$  és  $A_2$  véges felületek között történik a hőátadás és a hőmérsékletük  $T_1$  és  $T_2$ , akkor az alábbi összefüggés áll fenn

$$Q_{12} = A_1 \cdot F_{12} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad [W], \quad (10)$$

ahol az  $F_{12}$  a két felület közötti ún. sugárzásos hőátadás láthatósági együtthatója (*view factor* vagy *configuration factor*). Két felület közötti sugárzásos hőátadás ugyanis függ a felületek egymáshoz képesti elhelyezkedésétől, távolságától, alakjától, stb. Ezt az összefüggést jelképezi a láthatósági együttható. [II.13] Ennek értékét legtöbbször táblázatos vagy grafikonos forrásból lehet meghatározni.

Ha a felületeket nem foghatjuk fel abszolút fekete testnek, akkor a két felület emisszivitásának ismeretében az alábbi összefüggéssel lehet meghatározni a két felület közötti hőátadást:

$$Q_{12} = \frac{\sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \varepsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \varepsilon_2}} \quad [W] \quad (11)$$

Az  $\varepsilon$  felületi emisszivitás megadja egy test feketeségi fokát, azaz meghatározza, hogy adott hullámhosszon kibocsátott sugárzás intenzitása hányad része a fekete test sugárintenzitásának ugyanazon hullámhosszon. Szürke testek esetén az  $\varepsilon$  nem függ a hullámhossztól, így egy szürke test által kibocsátott sugárzás intenzitása minden hullámhosszon az abszolút fekete test sugárzásintenzitásának  $\varepsilon$  szorosa ( $0 < \varepsilon < 1$ ). A valóságban azonban a testek felületi  $\varepsilon(\lambda)$  emisszivitása hullámhosszfüggő.

Planck törvény alapján látható, hogy a fekete test hőmérsékletének növelésével a sugárzás intenzitása is növekszik és a Wien eltolódási törvény értelmében a hőmérsékleti sugárzási spektrumon található intenzitáscsúcs a kisebb hullámhosszak felé tolódik:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2897,8 \quad [\mu\text{m} \cdot \text{K}]. \quad (12)$$

Például a 6000°C fokos Nap sugárzási spektrumának a csúcsa közel az 550nm hullámhosszúságnál van, ami éppen az emberi látótartomány közepe. Azon testeknek, amik közel szobahőmérsékletűek (23°C) a sugárzási spektrumuk csúcsa a távoli infravörös-tartományba (10um hullámhossz) esik.

A távoli infravörös-tartományú sugárzás (*Far Infrared Radiation Detector* vagy *FIR Detector*) érzékelésére alapvetően két fajta félvezető alapú érzékelő szolgál [II.5][II.6]:

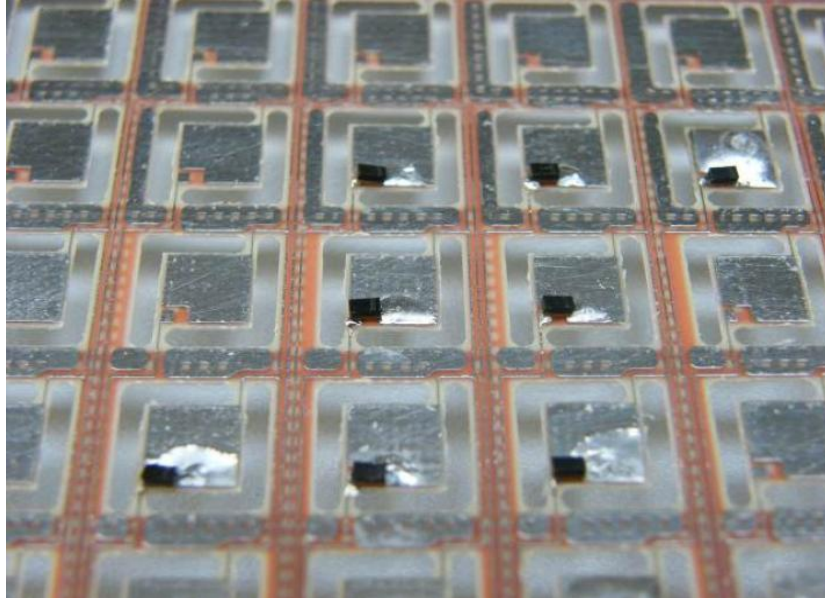
- A foton abszorpción alapuló érzékelőkben működésük során az elnyelődő foton egy szabad elektron-lyuk párt generál. A generálódott szabad töltéshordozók száma arányos az elnyelt sugárzás intenzitásával, elmozdulásra képesek, így a beeső sugárzás intenzitásával arányos áram mérésével egy távoli test hőmérséklete meghatározhatóvá válik. Előállításuk – köszönhetően az ún. egzotikus félvezetők alkalmazásának – rendkívül drága és működésük során hűtést igényelnek, ugyanis fontos, hogy a beeső hőszugárzás hatására keletkezzenek elektron-lyuk párok és ne a szenzor saját működési hőmérsékletének köszönhetően (termikus generáció).
- Termikus elvű detektorok esetén a beeső és elnyelődő foton hőmérsékletváltozást idéz elő a szenzorban, amit közvetve a detektor anyagának valamilyen hőmérsékletfüggő paraméterének a mérésével határozzuk meg (pl.: ellenállás változás). Ezeknek, a hűtést nem igénylő, félvezető alapú, termikus elvű szenzor mátrixoknak jóval olcsóbb az előállítása, kompaktabbak és általában alacsonyabb a fogyasztásuk is. Számos fajtájuk létezik a beeső foton által okozott hőmérsékletváltozás érzékelésének elve szerint: *bolometer* elvű, *termoelektromos* elvű, *piroelektromos* elvű, folyadék kristály elszíneződésén alapuló, stb.[II.7] A hűtést nem igénylő infravörös tartományú hőmérsékletérzékelő (uncooled IR detectors) szenzorok felépítése a CCD szenzorok mátrixos felépítéséhez hasonló. Ezeknél a szenzormátrix egyes pontjaiban egy-egy piroelektromos, mikrobolométer vagy Seebeck hatáson alapuló MEMS szenzor található. Ezen MEMS eszközök alkalmazásával gyorsan (tipikusan 10ms-on belül) lehet megállapítani egy távoli test hőmérsékletét/hőmérséklet-eloszlását.

#### 4. Hőmérséklet-eloszlást érzékelő kártya

Az ATX házakban található AGP és PCI Express kártyákon a rendszer működése közben kialakuló hőmérsékleti viszonyok vizsgálata kiemelkedő fontosságú. Szomszédos PCI foglalatokba helyezett kártyák között 20mm távolság van. Ezen kártyák közé így nagyobb mérőrendszerek, mérőfejek (pl.: infravörös hőkamerák [II.4]) nem férnek be, ezért is fontos egy vékony "lapszerű" érzékelő kártya kialakítása.

Természetesen lehetőség van a vizsgálat tárgyát képező áramköri kártyákon található félvezetőeszközökbe integrált hőmérsékletérzékelők alkalmazására is. Azonban ezen érzékelők számunkra csak a szilícium chipek hőmérsékletéről adnak információt, a tokozás, a NYHL hőmérsékleti viszonyairól, a többi félvezető eszköz illetve passzív elem hőmérsékletéről, a NYHL felületén kialakuló hőmérséklet-eloszlásról nem kapunk érdemi visszajelzést.

Másik tipikus felhasználási terület az ún. *rack* szekrényekben található eszközök hőmérséklet-eloszlásának működés közbeni vizsgálata. Ilyen berendezésekkel találkozhatunk különböző szervertermekben, telefonos kapcsolóközpontokban. Ezeknek a hálózati eszközöknek (routerek, switchek, stb.) rendkívül magas megbízhatóságúnak kell lenniük, így ezen eszközök működés közbeni vizsgálata elengedhetetlenül fontos! Azonban a rack szekrényben található eszközök között is maximum 2 cm hely található, ahová hőkamerák semmilyen körülmények között nem férnek és nem látnak be.

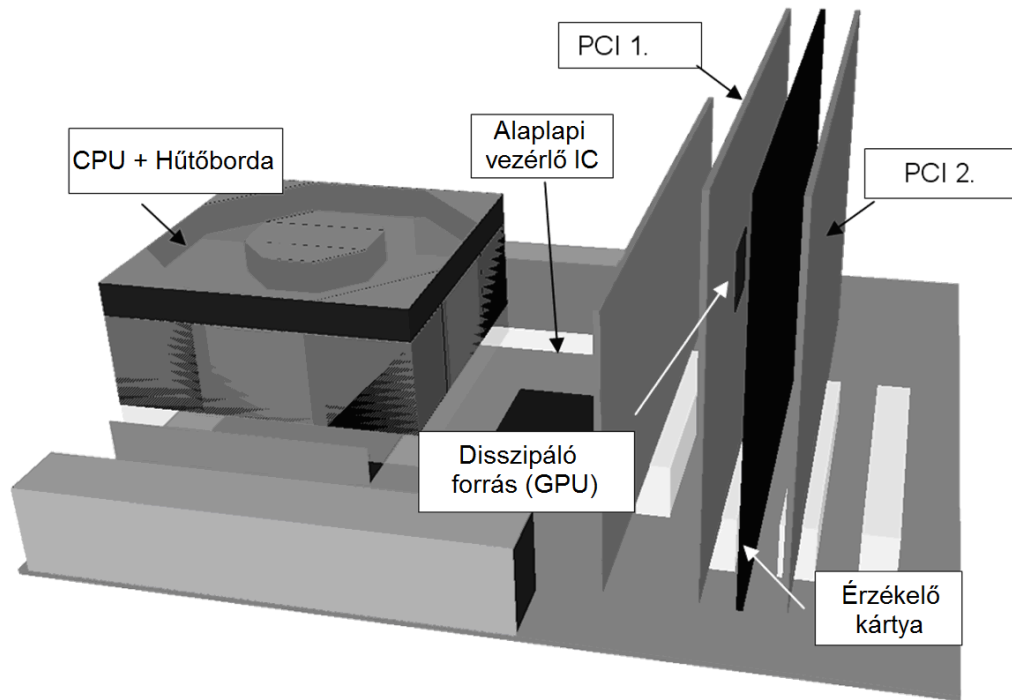


*II.1. ábra – A megvalósított érzékelő kártya feketére festés előtt*

A mérőeszköz 0,2mm FR4 hordozón lett megvalósítva (II.1 ábra). A mérőeszköz felületén, mátrixos elrendezésben található hőmérsékletérzékelő félvezetők egyesével címezhetőek és az érzékelt hőmérsékletük kiolvasható. A szenzor kártyán 5mm x 5mm nagyságú érzékelő pixelekből 5x8 azaz összesen 40 darab került elhelyezésre. Az elkészült panel 92mm x 88mm nagyságú lett. Az egyes pixeleket egy 1,4mm széles rés határolja és választja el a hordozó további részeitől illetve egymástól.

A mérések során az egyes érzékelő elemek címzését és a mért hőmérséklet kiolvasását mikrokontrolleres elektronika vezérli, és ennek segítségével USB buszon keresztül lehet megvalósítani a kommunikációt a számítógép és a kiolvasó elektronika között.

Az érzékelő kártyán egyszerű felületszerelt (SMD) diódákkal történik a hőmérsékletváltozás érzékelése. Az SMD diódák közül is a legkisebb geometriai méretű (0201 jelű) került beültetésre az egyes pixelekre, ami 0,25mm × 0,50mm nagyságot jelent. A mérések során a dióda nyitófeszültségének a változása arányos a hőmérsékletváltozással, ami kalibráció után a szokásos -2mV/°C –ra adódott. Már a tervezés fázisában is kiemelten fontos volt, hogy a dióda PN átmenete és a későbbiekben feketére festett pixel között a hőellenállás a lehetőségekhez képest minél kisebb legyen. Ennek érdekében az SMD diódák szubsztrátjukkal a réz pixel felület felé lettek beültetve, így biztosítva a lehető legnagyobb hőátadási felületet.



*II.2. ábra– A mérési összeállítás*

### III. Felhasznált Irodalom

- [I.1] M. Gordon, "Cramming more components onto integrated circuits", Journal of Electronics, Vol.38, No.8, (1965)
- [I.2] Bruce Guenin, "When Moore Is Less: Exploring the 3rd Dimension in IC Packaging", Electronics Cooling Vol.15, No.1, (2009)
- [I.3] Darrel R. Frear, "Materials Issues in Area-Array Microelectronic Packaging", TMS JOM Journal of Material, (1999)
- [I.4] M. Rencz, V. Székely, B. Courtois, L. Zhang, N. Howard, L. Nguyen, "Die attach quality control of 3D stacked dies", Int he Proceedings of Semicon West, pp78-84, (2004)
- [I.5] Sauciuc et al., "Air-cooling extension – performance limits for processor cooling applications", Proceedings of the XXth SEMI-THERM Symposium, pp. 74-80, (2003)
- [I.6] Chen Li and R.A. Wirtz:, "Development of a high performance heat sink based on screen-fin technology", Proceedings of the XXth SEMI-THERM Symposium, pp. 55-60, (2003)
- [I.7] S.V. Garimella, "Advances in mesoscale thermal management technologies for microelectronics", Proceedings of the 10<sup>th</sup> THERMINIC Workshop, pp. 185-206, (2004)
- [I.8] G. Jeffrey Snyder et al, "Hot Spot Cooling using Embedded Thermoelectric Coolers", Proceedings of the XXIIth SEMI-THERM Symposium, (2006)
- [II.1] L. Prandtl , „Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung“, Verhandlungen des dritten internationalen Mathematiker Kongress in Heidelberg, 1904
- [II.2] V. Székely, A. Páhi, A. Poppe, M. Rencz, "Electro-Thermal Simulation with the SISSI Package", Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Vol.21., Issue 1, pp. 21-31 , (1999)
- [II.3] Wunsche, S. Clauss, C. Schwarz, P. Winkler, F., "Electro-thermal circuit simulation using simulator coupling", IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol.5., Issue 3., pp.277-282, (1997)
- [II.4] AGA Thermovision 782, termék-leírás, elérhető: [http://64.201.62.190/HTML/aga\\_thermovision\\_780\\_782.htm](http://64.201.62.190/HTML/aga_thermovision_780_782.htm) [2008.Október]
- [II.5] Yang Zhao, Minyao Mao, Roberto Horowitz, et al., "Optomechanical Uncooled Infrared Imaging System: Design, Microfabrication, and Performance", Journal of Microelectromechanical Systems, 11 (2), pp.136-146., (2002)
- [II.6] Paul W. Kruse, David D. Skatrud, "Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems", Academic Press, ISBN 978-0127521558, (1997)
- [II.7] Muller M., Budde W., Gottfried-Gottfried R., et al., "A thermoelectric infrared radiation sensor with monolithically integrated amplifier stage and temperature sensor", Journal of Solid-state Sensors and Actuators, 54 (1-3), pp.601-605., (1996)
- [II.8] B Charlot, V Székely, M Rencz, Gy Bogнар, B Courtois, "An 8X8 Thermopile based uncooled infrared sensor", In: EMN04, European Micro and Nanosystems 2004, Esiee. &, &, 2004.01.01-2004.01.01., (2004). pp. 131-135.



- [II.9] A. Poppe A, G. Farkas G, M. Rencz, Zs. Benedek, L. Pohl, V. Székely, K. Torki, S. Mir, B. Courtois., *“Design Issues of a Multi-functional Intelligent Thermal Test Die”*, 17th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM'01), pp.50-57., (2001)
- [II.10] Wavelength Technology, elérhető: [http://www.wavelength-tech.com/Material-Ge\\_Polished.htm](http://www.wavelength-tech.com/Material-Ge_Polished.htm) [2009. május 25.]
- [II.11] Galvoptics Ltd. Germanium Convex Lenses, Elérhető: <http://www.galvoptics.fsnet.co.uk/ge.htm> [2009. május 25.]
- [II.12] Borsos Balázs, *“Hőmérsékletérzékelő mátrix integrált áramköreinek tervezése”*, BME Elektronikus Eszközök Tanszéke, Diplomaterv (2002)
- [II.13] John R. Howell, *“A Catalog of Radiation Heat Transfer Configuration Factors”*, 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill College, University of Texas at Austin, (2001)
- [II.14] Yunus A Cengel, Robert H. Turner, *“Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences”*, McGrawHill, ISBN 007-245426-1, (2005)
- [II.15] Catalogue of Material emissivity, elérhető: [http://www.electro-optical.com/html/bb\\_rad/emissivity/matlemisivty.asp](http://www.electro-optical.com/html/bb_rad/emissivity/matlemisivty.asp) [2009.május]
- [II.16] V. Székely, *“SUNRED: a new thermal simulator and typical applications”*, Proceedings of the 3rd THERMINIC Workshop, September 21-23, 1997, Cannes, France, pp. 84-90 (1997)
- [II.17] FLOTHERM Simulation environment leírás, elérhető: <http://www.flomerics.com/products/flotherm/index.php> [2008.október]
- [II.18] Z. Szűcs, G. Nagy, S. Hodossy, M. Rencz, A. Poppe, 2007. Vibration Combined High Temperature Cycle Tests for Capacitive MEMS Accelerometers, *Proceedings of the 13th International Workshop on THERMal INvestigation of ICs and Systems (THERMINIC'07)*, Budapest, Hungary 17-19 Sept. (2007)