



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Elektronikus Eszközök Tanszék

**Flexibilis hordozón kialakított hőmérsékleteloszlást
érzékelő kártya tervezése és karakterizálása**

TDK dolgozat

Szerzők

Rotaru Beniamin Daniel

Nyilas Lehel

Konzulens

Dr. Bognár György

Budapest, 2019

Tartalomjegyzék

I. Bevezetés	3
II. Érintésmentes hőmérsékletmérési lehetőségek	4
III. A hőmérséklet eloszlás érzékelő kártya fejlődési szakaszai	6
IV. Flexibilis hőmérsékleteloszlást érzékelő kártya	14
1) Flexibilis áramköri technológia ismertetése	15
2) Flexibilis hordozón kialakított áramkörök tervezési szabályai	17
3) A szenzor hőmérséklet érzékelésére szolgáló eszköz kiválasztása	19
4) A hordozótípus kiválasztása	20
5) Az érzékelő pixel mintázat kialakítása	20
6) Tervezés során alkalmazott szabályok	21
7) Layer stack megtervezése	21
V. A hőmérséklet-eloszlást érzékelő kártya időállandójának analitikus számítása	24
VI. Rigid-flex kártya modellezése és szimulálása FloTherm-ben	27
VII. Szimulációs és analitikus számítási eredmények összehasonlítása	29
VIII. A rigid-flex hőmérsékleteloszlást érzékelő kártya előzetes mérési eredményei	35
IX. Jövőbeli tervek	38
X. Összegzés és az érzékelő kártya tovább fejlesztési lehetőségei és lehetséges alkalmazási területei	39
XI. Felhasznált irodalom	39

I. Bevezetés

Adatközpontokban az egyre nagyobb számítási igény kiszolgálására (gépitanulás alkalmazások, nagyszámítási igényű feladatok, stb.) egyre több és egyre nagyobb teljesítményű félvezető eszközt helyeznek el – ún. rack fiókokba helyezett – áramköri hordozókon. A növekvő teljesítmény, egyre növekvő hődisszipációt és növekvő üzemi hőmérsékletet eredményez. A legnagyobb felületegységre eső disszipációval a rendszerchip eszközök, memória áramkörök és DC/DC konverterek rendelkeznek. Az áramköri kártya felületén rendkívül fontos, hogy a működés közbeni hőmérsékleteloszlást folyamatosan nyomon tudjuk követni. Ugyanis az áramkörön található félvezető elemek, alkatrészek működési paramétereit (pl.: munkapontok, erősítés értéke, kapuk késleltetése, stb.) befolyásolja, hogy az áramkör az adott pillanatban milyen hőmérsékleten van.

Például a legmelegebb – ún. hot-spot – pontok feltérképezésével lehetővé válhat a legvalószínűbb hibahelyek meghatározása. Ezen megfigyelésekre támaszkodva lehetővé válik a későbbiekben az áramköri kártya áttervezése termikus szempontokat is figyelembe véve, csökkentve a meghibásodás valószínűségét és növelve a várható élettartamot. Azonban a beépített hőmérsékletérzékelő szenzorokkal csak a legnagyobb teljesítményű félvezető eszközök rendelkeznek (rendszerchip eszközök, memóriák).

Erre nyújt megoldást a piacon található számos termikus, elektrotermikus szoftver. Ezen programok használatával jó közelítést kapunk arra nézve, hogy az áramkör hogy fog viselkedni és működni a későbbiekben (pl.: hőmérsékleti eloszlásokat kapunk egy hordozóról), viszont nem szabad megfeledkezni arról, hogy egy-egy szimuláció – főképp az elektrotermikus szimulációk – több órán sőt, akár több napon keresztül is futhat. Egy másik jelentős probléma, hogy akár csak egy paraméter megváltoztatásával a teljes szimulációt újra kell futtatni, illetve nem lehet pontosan tudni, hogy a modell, melyen a szimuláció fut, megfelelően közelíti-e a valóságot.

A szimulációs eredményeket mindig szükséges mérésekkel validálni. Az elkészült áramkör bemérése, tesztelése egy előre kialakított tesztkörnyezetben zajlik, ez lehet egy tesztáramkör vagy egy berendezés is, de az esetek legnagyobb többségében nem az áramkör végső helyén vagy üzem közben történik. Ebből az következik, hogy míg a tesztkörnyezetben egy mérés érvényes és helyes lehet, addig az áramkör valódi működés közben produkálhat eltéréseket, esetleg hibák adódhatnak. Ebben az esetben csak az a lehetőség marad, hogy az áramkört beszerelés után, működés közben kell mérni, de ez nagy nehézségekkel jár, ugyanis

például a tesztáramkörök, szenzorok, hőmérsékletérzékelők, hűtőrendszerek beszerelése is problematikus lehet, ha a késztermékben nem áll rendelkezésre elég hely, és a beszerelt mérő-, érzékelőeszközök módosítsák a valóságos működési körülményeket. Ez utóbbi esetben a méréseket úgy kell végrehajtani, hogy az áramköri környezetet a lehető legkevésbé változtassuk meg! Erre adnak lehetőséget az érintésmentes hőmérsékleteloszlás mérésére alkalmas eszközök. Egy ilyen, újtípusú, vékony, érintésmentes hőmérsékleteloszlás felvételére alkalmas, flexibilis, rigid-flex áramköri hordozón kialakított érzékelő kártya tervezésének, az érzékelési mechanizmus modellezésének és karakterizáló mérések elvégzésének lépéseit mutatjuk be a TDK dolgozatban.

II. Érintésmentes hőmérsékletmérési lehetőségek

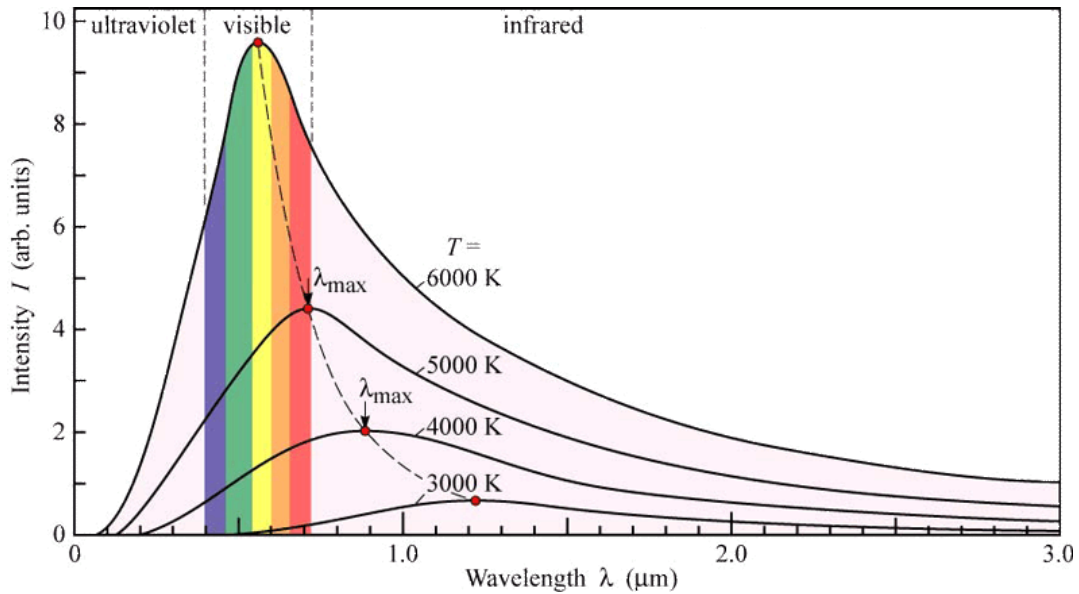
A hőmérséklet érintésmentes mérésének megértéséhez legyen a kiindulási pont a Planck-féle sugárzási törvény, mely egy T hőmérsékletű, abszolút fekete test egységnyi felületéről, adott idő alatt a kibocsátott λ hullámhosszúságú sugárzás energiáját határozza meg.

$$E(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{h^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1}$$

2.1 – Planck-féle sugárzási törvény

A képletben a $h=6.6 \cdot 10^{-34}$ Js, $k=1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K és $c=3 \cdot 10^8$ m/s állandónak felelnek meg. Egyabszolút fekete test hőmérsékletének növekedésével a sugárzás intenzitása is növekszik, miközben - a Wien-féle eltolódási törvény értelmében - a sugárzási spektrum intenzitáscsúcsa egyre kisebb hullámhosszok felé tolódik a hőmérséklet növekedése mellett.

Az abszolút fekete test egy olyan hipotetikus test, amely minden ráeső sugárzást elnyel, és emisszió képessége valamennyi test közül a legnagyobb. Az ε felületi emisszivitás meghatározza, hogy adott hullámhosszon kibocsátott sugárzás intenzitása hányad része a fekete test sugárintenzitásának ugyanazon hullámhosszon. Szürke testek esetén az ε nem függ a hullámhossztól (valójában mégis függ, de az elhanyagolható a függés kis mértéke miatt), így a szürke test által kibocsátott sugárzás intenzitása minden hullámhosszon az abszolút fekete test sugárzásintenzitásának ε szorosa, ahol ε 0 és 1 közötti szám lehet Szobahőmérsékleten (20-25 °C) a testek sugárzási spektrumának intenzitáscsúcsa 10 μ m környékén található, amely a távoli infravörös sugárzás tartománya. [1][4]



2.2 - Az abszolút fekete test sugárzási spektruma

A félvezetőn kialakított távoli infravörös-tartományú sugárzás (*Far Infrared Radiation* – *FIR*) érzékelésére szolgáló szenzoroknak két csoportja különül el a szenzor működését tekintve:

- Foton abszorpción alapuló szenzor: A félvezetőn elnyelődő foton egy szabad elektron-lyuk párt generál, ezáltal az elnyelt sugárzás intenzitásával lesz arányban a generálódott szabad töltéshordozók összesége. Ezek a töltéshordozók képesek elmozdulni, tehát elektromos áram indul meg a félvezetőben, melynek nagysága szintén arányos az elnyelt sugárzás intenzitásával, az áram mérésével pedig a sugárzó test hőmérséklete meghatározható. [1]
- Termikus elvű szenzor: a félvezető felületére beeső és elnyelt fotonok hőmérsékletváltozást okoznak az érzékelőben. Ez a hőmérsékletváltozás közvetve okozza valamilyen hőmérsékletfüggő paraméter megváltozását (pl.: ellenállás változás vagy nyitófeszültség változás), melyeket mérni lehet, és a mért értékekből visszafejtve meghatározható a távoli test hőmérséklete. [1]

Mindkét érzékelő típusnak vannak előnyei és hátrányai is. A foton abszorpción alapuló érzékelők nagyon gyorsak, μs körüli a rendszer időállandója, illetve rendkívül nagy az érzékenységük. A hátrányaik közé tartozik, hogy az előállításuk drága, mivel átmeneti fémeket tartalmazó (kadmium, antimon, stb.) vegyület félvezetőkből (pl.: Indium-Antimon) kerülnek kialakításra, illetve működésük mellett hűtést igényelnek. Ennek oka, hogy a félvezetőben az elektron-lyuk pár nemcsak a beeső sugárzás hatására, hanem jelentős mértékben a termikus generáció következtében jön létre. A szenzor működéséhez ugyanis fontos, hogy a tiltott

sávszélesség kisebb legyen, mint távoli infravörös-tartományú fotonok energiája, mivel csak ebben az esetben tud a foton abszorbeálni és elektron-lyuk párt generálni. [1]

Termikus elvű érzékelők esetén az előállítás olcsóbb, mivel csak hagyományos mikrotechnológiában használatos anyagokat és eljárásokat használnak a gyártás során, illetve hűtést sem igényelnek, ezáltal kompaktabbak, és a fogyasztásuk is alacsonyabb. Hátrányuk, hogy a mérési tartomány kisebb, mint a foton abszorpciós érzékelők, és hogy e szenzorok időállandója ugyan nagyobbak, mint a foton abszorpción alapuló érzékelők időállandója, de nagyságrendben összemérhetők. A termikus elvű szenzorok között is meghatározhatók különböző kategóriák attól függően, hogy milyen elven érzékelik a hőmérsékletváltozást. A három legjelentősebb osztály a következő:

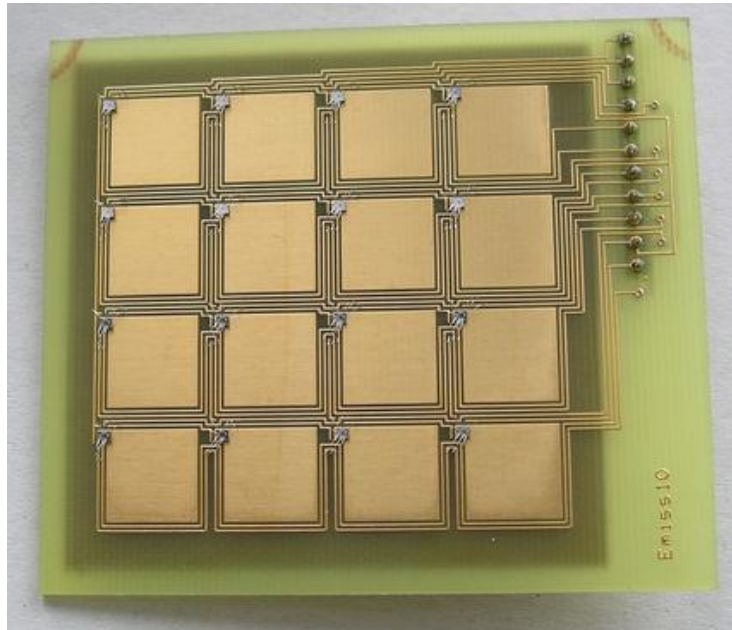
- Bolométer alapú szenzor: működésének alapja a beeső sugárzás töltéshordozó sűrűség megváltozást idéz elő, mely ellenállás változást jelent, ami mérhető. [1]
- Piroelektromos alapú szenzor: működése a dielektromos polarizáción alapszik. Ezeknél a szenzoroknál a változó és mérhető paraméter a polarizáció vagy a feszültség változás. [1]
- Termoelektromos alapú szenzor: működésének fizikai alapját a Seebeck-effektus adja, vagyis ha két különböző anyagot két helyen összekapcsolnak és a két kapcsolódási pont különböző hőmérsékletű, akkor a két pont között feszültség mérhető. Ebből következik, hogy e szenzorok esetén a mért paraméter a feszültség változás. [1]

Az Elektronikus Eszközök Tanszékén folyó kutatásban kapcsolódva olyan megoldást kívántunk találni az érintésmentes hőmérsékletérzékelésre, amely a korábban említett típusoknál olcsóbb, és egyszerűbb kivitelezni, és lényegesen vékonyabbak, melynek célja az, hogy az aktív elektronikai egységekben, rack-szekrényekben található áramköri kártyák közé beférjen. Ennek alapján született meg a hőmérsékleteloszlást érzékelő kártya.

III. A hőmérséklet eloszlás érzékelő kártya fejlődési szakaszai

Az első érintésmentes hőmérsékleteloszlást érzékelő kártya prototípus, mely szintén hősugárzás érzékelésén alapult, még nem volt flexibilis, a hordozó epoxy gyanta-üvegszövet (FR4) volt. A kártyán 4x4 darab négyzet alakú réz felület lett kialakítva, egyenként 1x1 cm² felülettel, és melyek sarkaiba TMC1A termikus tesztchipek kerültek beültetésre a hőmérsékletváltozás mérésének céljából. A mátrix elrendezésben levő chipek egyenként címezhetők, és a kimentti jelük hőmérséklettel arányos frekvenciája kiolvasható. A chip

működésének alapja, hogy 1°C hőmérséklet változás esetén a kimenetén 24 kHz-es frekvenciaváltozást produkál a TMC1A, ezáltal igen pontos, 0,1°C-os eltérés is kimutatható. [1]



3.1 - Az első érzékelő kártya megvalósítva feketére festés előtt [1]

A sugárzó forrás és az érzékelő pixelek között a sugárzásos hőátadás jelentősen függ az egymáshoz viszonyított térbeli elhelyezkedéstől. Mivel az egyes felületeket nem foghatjuk fel abszolút fekete testnek, ezért a két test közötti hőátadás a felületi emisszivitás függvényében a következő:

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

3.2 – Két test közti hőátadás összefüggése

, ahol ε_1 és ε_2 a forrás és az érzékelő felület, felületi emisszivitása. A két test egymáshoz viszonyított térbeli elhelyezkedést az F_{12} , a felületek közötti láthatósági együttható írja le. Több mérés is született, hogy a láthatósági együttható érték meghatározásra kerüljön, és ezzel együtt igazolva legyenek az elméleti számításból származó értékek. A mérések során a hőforrás mérete 1x1 mm. [1]

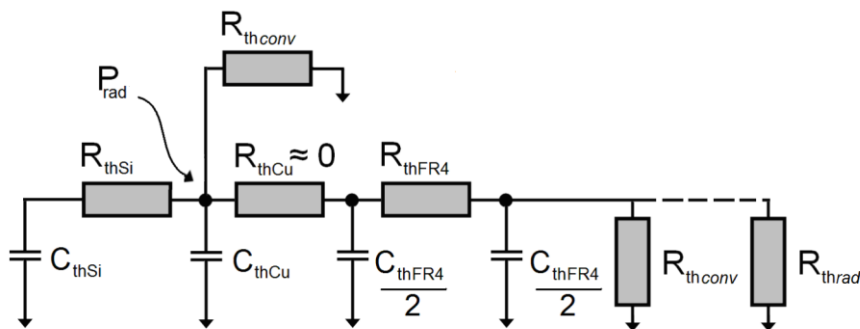
a forrás elhelyezkedése a mért pixelhez képest	pixel és forrás közti távolság centiméterben	felületek közötti láthatósági együttható értéke
mért pixellel párhuzamos	1	$2,4 \cdot 10^{-3}$
mért pixellel párhuzamos	2	$7,34 \cdot 10^{-4}$

szomszédos pixel középpontjával párhuzamos	1	$8,43 \cdot 10^{-4}$
átlósan szomszédos pixel középpontjával párhuzamos	1	$3,9 \cdot 10^{-4}$

3.3 - Láthatósági együttható mérések eredménye [1]

A hőmérsékleteloszlást érzékelő kártyához elkészült egy koncentrált paraméteres, kompakt termikus modell. A kompakt modell alkotás célja, hogy az eszközök termikus viselkedését leírásához ne kelljen parciális differenciálegyenleteket megoldani, hanem elegendő legyen lineáris egyenletrendszereket kezelni. Így a modellalkotás során a termikus hálózatoknál elosztott paraméteres modellezés helyett elegendő lehet megfelelő pontosságú koncentrált paraméteres RC létrával leírni a rendszert.

A kártya modelljében a sugárzott hő (P_{rad}) a feketére festett rézfelületen nyelődik el. Az elnyelt hő a chip aktív területéhez a szilícium chip felrögzítésén és a félvezető szubsztráton keresztül (R_{thSi}) jut el, másrészt a rézfelületen (R_{thCu}) keresztül jut el a rézfelület és az FR4 határfelületéig, majd onnan az érzékelő kártya hátoldaláig (R_{thFR4}). A kártya a környezetének is lead hőt, egyrészt természetes konvekcióval (R_{thconv}), másrészt hősugárzással (R_{thrad}). [1]



3.4 – A hőmérséklet-eloszlást érzékelő kártya termikus modellje [1]

A R_{th} és C_{th} kiszámításánál a képletben a λ a fajlagos hővezetési együttható és c_v a fajlagos hőkapacitás az anyagra jellemző paraméter, az A az anyag felülete, az L pedig a vastagsága. Továbbá szükség van a konvektív (R_{thconv}) és sugárzási (R_{thrad}) hőellenállás értékére. Ezek az értékek az alábbi módon határozhatók meg:

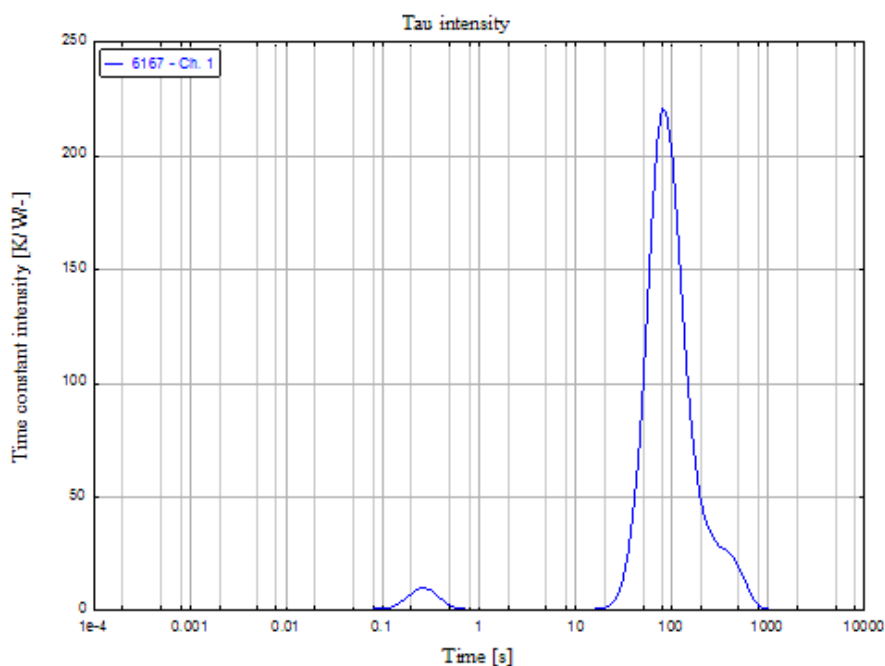
$$R_{th} = \frac{L}{\lambda \cdot A}$$

$$C_{th} = c_v \cdot A \cdot L$$

$$R_{thconv} = \frac{1}{h \cdot A_{kártya}}$$

$$R_{thrad} = \frac{1}{A_{kártya} \cdot \varepsilon_{FR4} \cdot 4\sigma \cdot (T_{kártya}^3 - T_{környezet}^3)}$$

Adott paraméterek és termikus modell elemértékek mellett egységugrásra adott tranziens válasz SPICE szimulációját elvégezve az időállandó 127 sec-re adódott. SunRed szimulációt elvégezve kiderült, hogy a rendszernek két időállandója van, és ezek közül a domináns 98 sec nagyságrendileg egybevág a 127 sec-kel. Így tehát a beállási idő körülbelül 300 sec körülire esett e kártya esetén. [1]



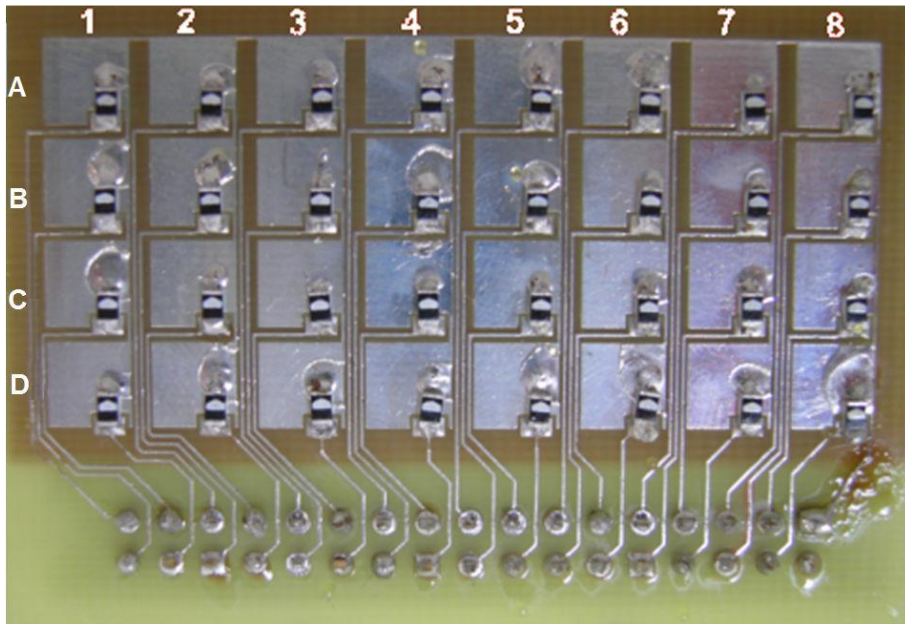
3.5 – Az IC-s hőérzékelő kártya időállandó spektruma a SunRed [1]

Az adott kártya ugyan alkalmas a hőmérsékletet érintésmentes meghatározására, azonban a nagy időállandó és a kis felbontás miatt további fejlesztésre volt szükség.

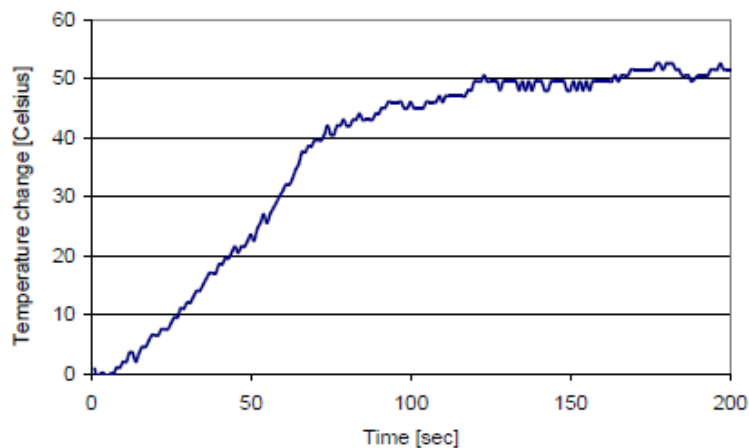
Ennek eredményeként a következő érzékelő kártya 4x8 pixelt tartalmazott, illetve a TMC1A termikus tesztchip helyett már 0603 ¹méretű SMD dióda került beültetésre. Emiatt a mérések során már nem a digitális frekvenciában változó jel mutatja a hőmérsékletváltozást, hanem a dióda nyitófeszültség változása, mely a szükséges kalibráció elvégzése után a jól ismert -2mV/°C –ra adódott. További változtatás még, hogy a nagyobb felbontás miatt az egyes

¹ 0603 méret 06 mil hosszú és 03 mil széles alkatrészt jelent. 1 mil az 25.4 µm felel meg

pixel méretek 5x5 mm-re csökkentek. A fejlesztett kártyán végzett mérésekből származó eredmények alapján jelentősen csökkent az időállandó. A diagramról leolvasható, hogy az állandósult állapot hőmérsékletének 95%-át 100 szekundum alatt ért el, vagyis elmondható, hogy a fejlesztett érzékelő időállandója mindössze harmada az előző kártya időállandójának. Ez leginkább a kártya teljes méretének a csökkenésének volt köszönhető (kb. fele akkora lett). [1]



3.6 – A 4x8 pixeles érzékelő kártya festés előtt [1]

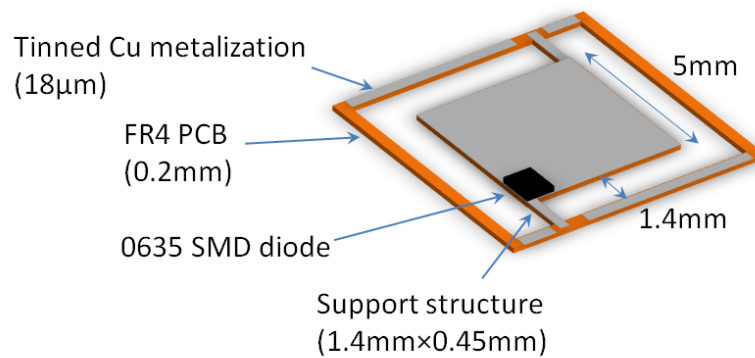


3.7 – A kártya egy pixeljének termikus tranziens görbéje [2]

A fent tárgyalt hőmérsékleteloszlást érzékelőkártya még nem érte el a várakozásnak megfelelő eredményt sem időállandban, sem érzékenységben, továbbá egy újabb probléma mutatkozott meg. Az egyes pixelek között a termikus „áthallás”, crosstalk-effektus igen jelentős volt, vagyis a pixelek közötti termikus ellenállás kicsi, ezért a felmelegedő pixelek közelében

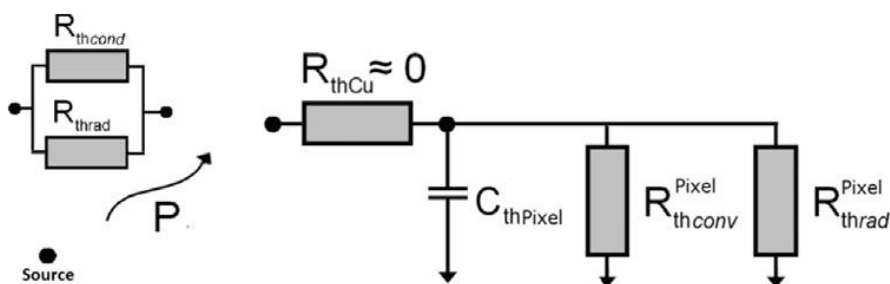
lévő pixelek nem a hősugárzás hatására (pl.: szembe van velük a sugárzó forrás), hanem a hővezetés következtében melegednek fel. [1]

Ennek elkerülése érdekében a következő kártyatípus esetén minden egyes pixel szeparált lett, hogy az áthallás lecsökkenjen (ugyanis csak két vékony nyakkal kapcsolódik a hordozóhoz, így minden egyes pixel egymástól független termikus rendszernek tekinthető), továbbá az időállandó csökkenés érdekében az eredeti FR4 hordozó vastagsága 0,2 mm-re csökkent. Ezzel a hordozó hőkapacitása, így az időállandója is lecsökken.



3.8 - Egy elszeparált pixel az újabb típusú érzékelő kártyából [5]

Az új kialakításnak köszönhetően a meglévő termikus modellt szükséges volt újra tervezni, azonban a könnyebb számolás és szimuláció érdekében a modellen végzett mérések és szimulációk eredményeként egy egyszerűsített modell jött létre, és ebben az esetben a sugárzás formájában átadott teljesítmény is modellezésre került (ennek okát fogjuk látni később).



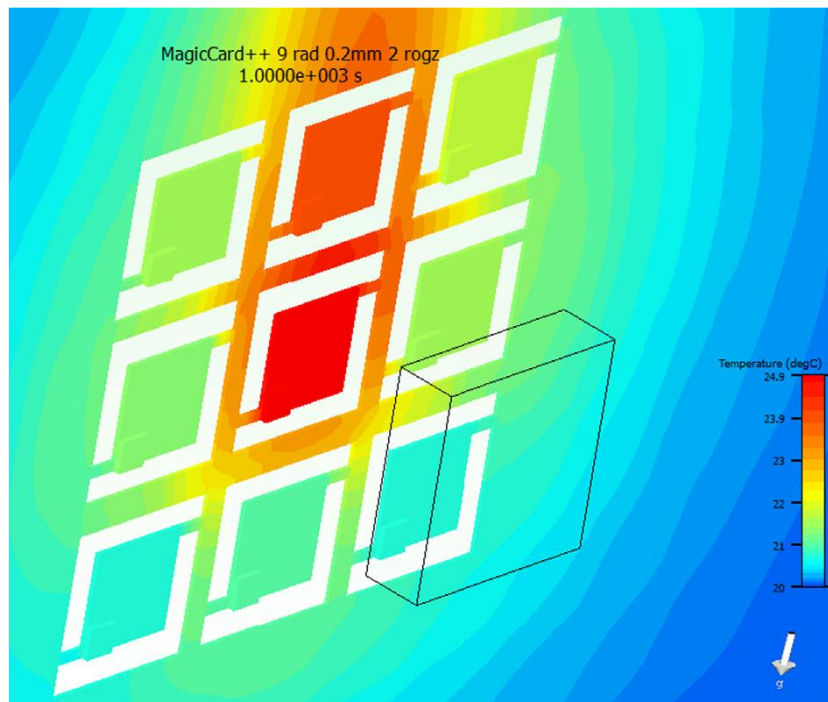
3.9 - A szeparált pixelű érzékelő kártya termikus modellje [3]

Az érzékelő kártya egyszerűsített termikus modelljére föl lehet írni az átviteli függvényt az s tartományban. A képletben az R_1 értéke az R_{thcond} és az R_{thrad} replusz értéke, R_2 pedig az R_{thconv}^{Pixel} és az R_{thrad}^{Pixel} replusz értéke.

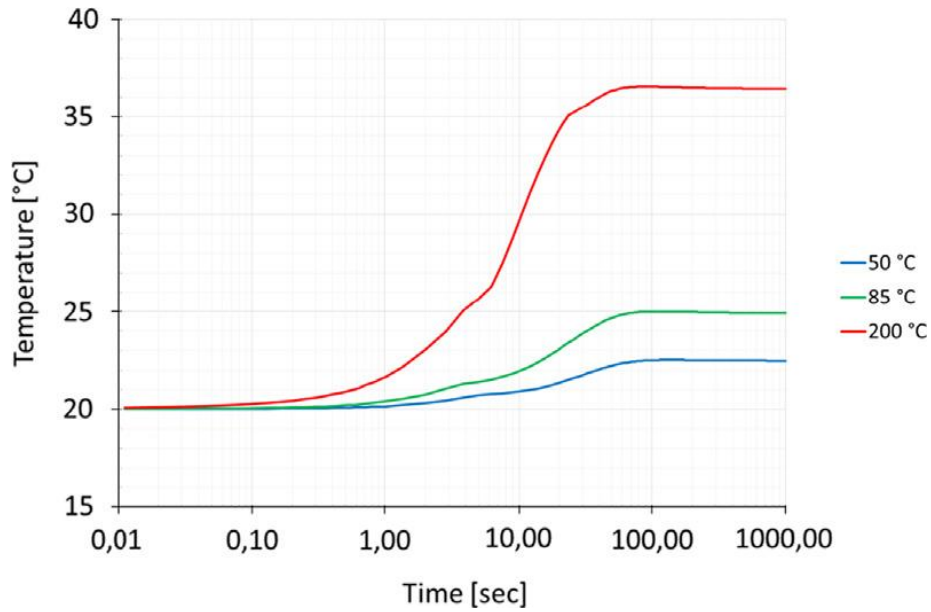
$$X(s) = \frac{\frac{1}{s \cdot C_{thpixel}} \times R_2}{R_1 + \frac{1}{s \cdot C_{thpixel}} \times R_2}$$

3.10 - A tömör termikus modell átviteli függvénye

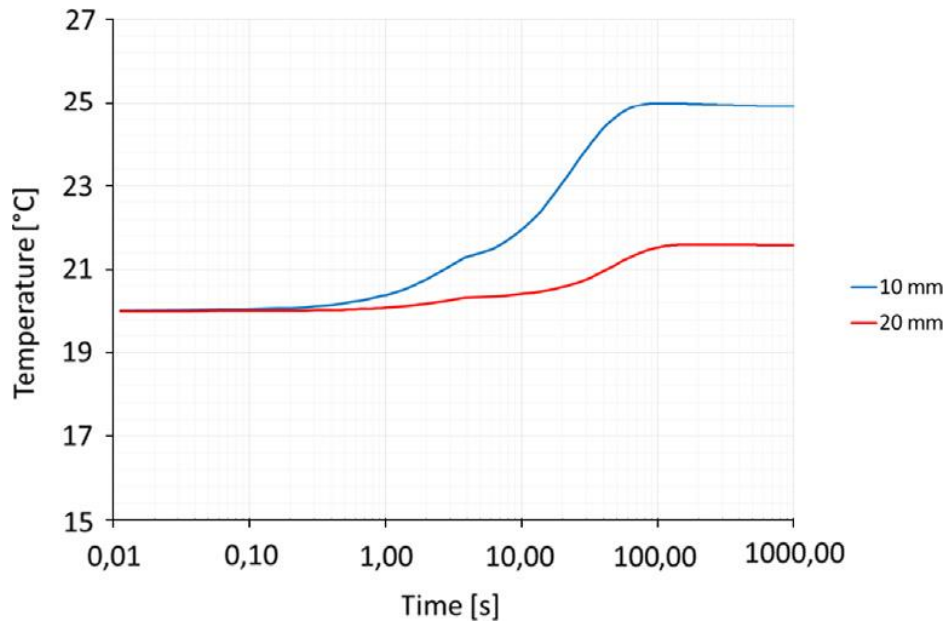
Az elvégzett szimulációk során, melyet a Mentor Flotherm termikus és folyadékdinamikai (CFD) szimulációs eszközével végeztek, az érzékelők egy 3x3-as mátrix elrendezésben láthatók, melyben a középső pixel elé van elhelyezve a sugárzó hőforrás adott távolságra. A szimulációk során a konvektív hőátadás is megfigyelhető volt. Az időállandó mérése is megtörtént egyidejűleg a szimulációkkal különféle hőforrás hőmérsékleten és hőforrás távolságokkal az érzékelő kártyától. A kapott eredmények alapján egyértelműen azt lehet állítani, hogy a növekvő hőforrás hőmérséklete esetén és a hőforrás távolságának csökkentésével az érzékelőtől az időállandó növekvő tendenciát mutat. A hőforrás távolságának és hőmérsékletének az időállandóra gyakorolt hatása csak akkor áll fenn, ha a hőforrás és az érzékelő kártya pixele közel kerül elhelyezésre egymáshoz képest. Szimulációk és számítások alapján, ha a pixel oldalél hosszának (mint karakterisztikus dimenzió) kb. ötszörösén belül kerülnek elhelyezésre egymáshoz képest, akkor az időállandó kiszámításánál ezt figyelembe kell venni. Ezért került bele a modellbe a hőforrás és a pixel közötti termikus transzferimpedancia is.



3.11 - A hőmérséklet-eloszlás a kártyán és a konvektív hőátvitel észlelése [3]



3.12 - Időálló diagrammok különböző hőmérsékleten [5]



3.13 - Időálló diagrammok különböző távolságokból [5]

a forrás hőmérséklete [°C]	távolság a forrás és a pixel között [mm]	τ időálló [sec]
50	10	23,6
85	10	20,1
200	10	11,4
85	20	43,0

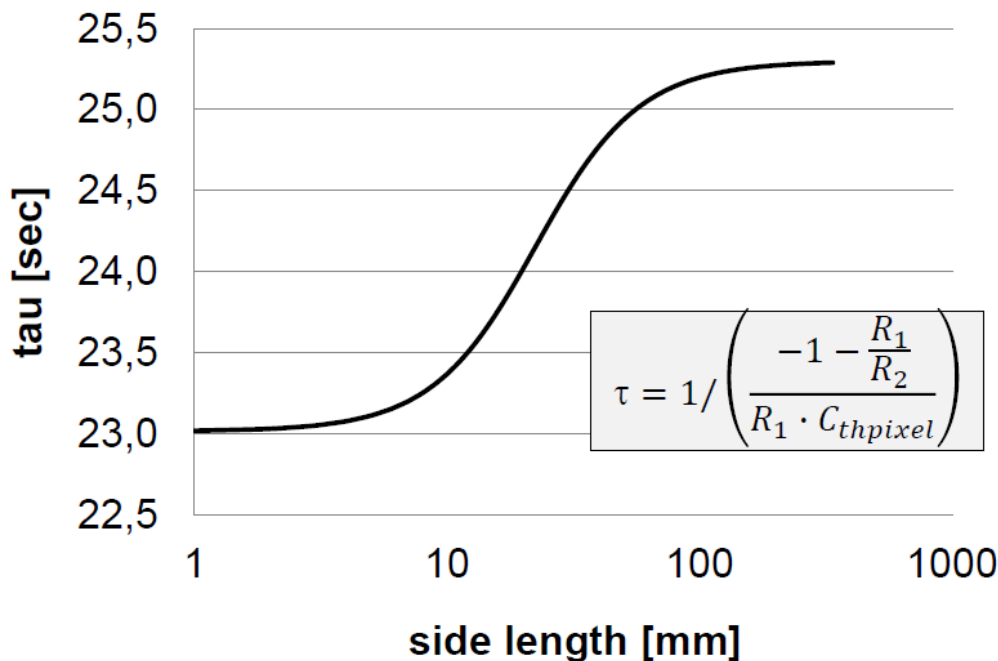
3.14 - Időálló értékek a forrás hőmérséklet és távolság függvényében [5]

A kapott eredmények akkor elfogadhatók, ha több megközelítésből is ugyanaz az eredmény adódik, vagy nagyon közel esnek egymáshoz az eredmények, ezért a szimulációkon kívül analitikus számításra is szükség volt.

Az időállandó számításához legyen a kiindulási pont a rendszer átviteli függvénye, melyen alkalmazva az inverz Laplace transzformációt és pár átrendezést követően megkapható az időállandó értékére egy egzakt összefüggés. Az időállandó értéke a pixelek méretének változtatása mellett kiértékelhető és ábrázolható (lásd 3.16 ábra). Erről leolvasható, hogy egy adott határon túl a pixel méret csökkentése nem hoz javulást az időállandó javára, az nem fog tovább csökkenni. Az analitikus számítás megoldásával az időállandó legjobb esetben 23 lett, miközben a forrás és a pixel közti távolság végig 1 cm volt. [3]

$$\tau = \frac{1}{\frac{-1 - \frac{R_1}{R_2}}{R_1 \cdot C_{thpixel}}}$$

3.15 – Egy pixel időállandójának kiszámítására szolgáló képlet



3.16 - A τ időállandó értéke a távolság függvényében [5]

IV. Flexibilis hőmérsékleteloszlást érzékelő kártya

A következő fejezetekben az elmúlt félévekben végzett saját munkánkat kívánjuk bemutatni. A TDK munka keretében kifejlesztett hőmérsékleteloszlás érzékelő kártya ún. rigid-

flex technológián készült, az érzékelők egy vékony (10...25 μm) flexibilis hordozón kerültek kialakításra. Nagy előnye az ilyen technológiával kialakított érzékelő kártyáknak, hogy az érzékelés időállandóját jelentősen csökkenthető.

A szenzorkártya egy egyedi gyártástechnológián került kialakításra, ezért szükséges volt a teljes fizikai terv megtervezése mellett, a technológia egyes lépéseinek a módosítása is. A tervezés során ráadásul termikus szempontokat is figyelembe kellett venni.

Ennek érdekében a teljes szenzorkártyáról előzetesen szükség volt egy 3D CAD modellt alkotni, amelyen CFD szimulátorral állandósult állapotbeli és tranziens termikus szimulációkat futtatunk. Ezáltal sikerült meghatározni az egyes érzékelő pixelek termikus időállandóját.

A szenzor pixelek termikus kompakt modelljét felhasználva, figyelembe véve a párhuzamos hűtőket sikerült a szimulációk eredményét analitikus úton is ellenőrizni. A szimulációk és analitikus modellezés eredményét karakterizáló mérésekkel validáltuk.

1) Flexibilis áramköri technológia ismertetése

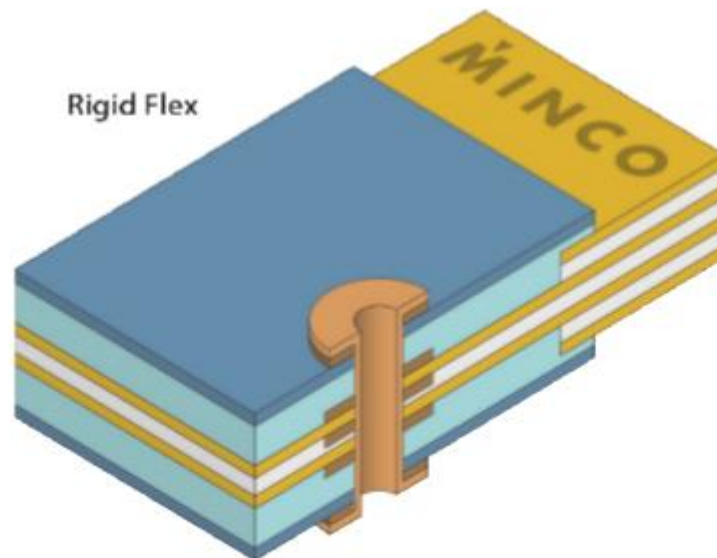
Flexibilis nyomtatott huzalozású lemezek segítségével hajlékony áramkörök hozhatók létre különféle mozgó szerelvények, 3D szerelvények összekapcsolására illetve rezgésálló berendezések áramköreinek megvalósítása céljából. Ezen kívül számos további előnye felsorolható:

- hajlékonyságának köszönhetően szabadon illeszthető be az áramkör a készülékházban
- készülékházak méretei lecsökkenthetők
- magas a megbízhatósága, mivel
 - lehetőség van a hordozón a vezetékezés bevonása a hordozóval megegyező anyaggal annak érdekében, hogy a vezetékezés külső fizikai hatásokkal szemben ellenállóbb legyen,
 - rendkívül sok hajlítási ciklust elvisel,
 - és magas a rezgésekkel szembeni ellenálló képessége,
 - és ezek összességében növelik az áramkör élettartamát.

A hőmérsékleteloszlást érzékelő kártya fejlesztése során a flexibilis hordozóra nem a hajlékonysága, hanem a kis vastagsága miatt esett a választás, várhatóan ezzel a termikus hőkapacitás tovább csökken, aminek következtében a rendszer időállandója tovább javul.

A flexibilis áramkörök több fajtája ismert. A single layer esetében egy flexibilis hordozón egy vezető réteget hoznak létre, melyre egy fedőréteg kerül, double layer esetén az

az eltérés az előbb említett képest, hogy a hordozó mindkét oldalán ki van alakítva vezető réteg, és összekapcsolásuk viákon keresztül van megoldva. Multi layer esetén három vagy annál több vezető rétegről van szó. A flexibilis áramkör kialakítási típusainak egy speciális változata a *rigid-flex* megvalósítás. Ez esetben egy merev (rigid rész) és egy flexibilis (flex rész) egység képez egy áramköri hordozó, ahol merev rész általában hagyományos FR4 anyagú. Ez a kialakítási mód legfőképp merev áramkörök összekötésénél használatos. [9]



4.1.1 – Rigid-flex struktúra felépítése [9]

A flexibilis hordozók általában valamilyen rugalmas műanyagból készülnek. Két nagyon elterjedt műanyag típus terjedt el az iparban. A *poliészter*, röviden PET egy szerves anyag, előnye, hogy olcsó, viszont ezzel szemben nem ellenálló a magas hőmérsékletekkel szemben, nem képes elviselni a reflow kemencék hőmérsékletét forrasztás közben, nagyon limitált a hajlítások száma, illetve a *poliimid*hez képest csak vastagabb réteg hozható létre. A

másik műanyag típus az imént említett poliimid, mely szintén szerves anyag. A poliimidnek számos jó tulajdonsága van, ragasztható műanyagok közé sorolható, ezáltal több réteg is egymáshoz rögzíthető, több tíz-száz ezer hajlítási ciklusnak is ellenáll, jó elektromos szigetelő, ellenáll a forrasztási hőmérsékletnek és a poliészternél vékonyabb réteget is létre lehet hozni, akár 25 mikron vastagút is. [7]

Az új flexibilis hőmérsékleteloszlást érzékelő kártya hordozójaként csakis a poliimid jöhet szóba főként az elérhető minimális vastagság miatt. A hajlékony hordozón kialakítható áramkörök gyártási technológiai sora eltér a merev hordozós NYHL gyártásától. A gyártási lépések röviden a következők:

1. A hordozó ragasztóval való bevonása. Ez általában akril vagy epoxy ragasztó, mely megfelelő alap a réz réteg számára.
2. Réz fólia fölville a hordozóra. Ez a technológiai lépés laminálással történik, mely során akár hengerléssel és hőkezeléssel egybekötve is történhet.
3. Furatok létrehozása egyszerre több hordozón történik, melynek során két merev réteg közé kerülnek a hajlékony hordozók. A furatok mechanikai fúrással készülnek, de előfordul mikrovíák esetén, hogy a kis furatátmérő miatt lézeres „fúrásra” van szükség, persze ezzel a költségek is növekednek.
4. A furatfémzés létrehozásának technológiája megegyezik a merev hordozók furatfémzési eljárásával.
5. következő lépésként a réz rétegből ki kell alakítani az áramkör rajzolatát. Ehhez fotorezisztet szükséges felvinni a rézrétegre, majd egy maszkon keresztül UV fényel levilágítva a levilágított fotoreziszt vagy felbontja polimer molekula láncait és oldhatóvá válik, vagy polimerizálódik, mely során oldhatatlan lesz, mindez attól függ, milyen típusú fotoreziszt került a rézre.
6. Kémiai marás során a fotoreziszt által védtelen réz felületek lemaródnak, kialakítva a vezetési mintázatot.
7. Az elkészült áramkör top és bottom oldalára is fedőréteg kerül. Ennek több célja is lehet, egyrészt forrasztásgátló maszkként viselkedik, illetve a huzalozás külső fizikai sérüléseivel szemben véd. A fedőréteg anyaga is poliimid az esetek többségében. [8]

2) Flexibilis hordozón kialakított áramkörök tervezési szabályai

A hatékonyan működő és megbízható áramkör megtervezése során szükséges betartani különféle tervezési irányelveket. Akárcsak a merev hordozós áramköröknél, a flexibilis

áramkörök esetén is léteznek, és célszerű vagy néhány esetben kötelező is betartani. A merev hordozós áramköröktől abban tér el leginkább a flexibilis hordozós áramkörök tervezése, hogy mindig szem előtt kell legyen, hogy a flex-hordozó háromdimenziós struktúra, nem csupán egy sík lemez.

Tervezés során előre ismerni kell, hol fog meghajlani, deformálódni a hordozó, és hányszor, mivel ez a pont kritikus is lehet. Növekvő rétegszám miatt növekszik a vastagság, ezáltal egy hajlítás során a külső és belső hajlítási sugár különbsége egyre nagyobb. Az áramkör belső fele fölgűrődhet, míg a külső réteg megnyúlhat, elszakadhat, a forrasztások mechanikai feszültség lép fel. Ennek kiküszöbölése lehetséges az adott terület merevítésével, szalagrugó alkalmazásával, réz vezetők helyett rugalmas vezető ragasztó alkalmazásával. Ezen megoldások használatának ellenére a hajlítási sugár egy adott ponttól már nem csökkenthető lejjebb, és erre a minimális hajlítási sugár értékre létezik a gyakorlatban használt két irányelv, miszerint double layer struktúra esetén a sugár az áramkör vastagságának minimum a 12x, míg multi layer esetben a sugár az áramkör vastagságának minimum a 24x értéke szükséges, hogy legyen. [8][9]

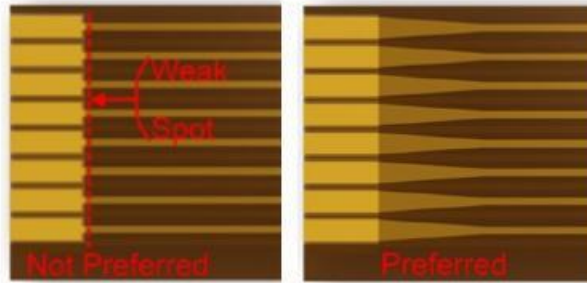
A teljes hordozó vastagság csökkentésével tovább csökken a minimális hajlítási sugár, melyre több módszer is rendelkezésre áll. Csökkenthetők a hordozó egyes rétegeinek a vastagsága, léteznek olyan ragasztó anyagok, melyek vékonyabb réteget hoznak létre és akár az alkalmazott réz rétegből is lehet vékonyabbat választani.

Kerülni kell a vezetékek derékszögben való megtörését. A 45°-ban megtört vezeték elfogadható, de a legjobb megoldás az ívelt kanyarulatok kialakítása. Nagyfeszültségű áramkörök esetében a hegyes részekenél csúcshatás lép fel, ezen felül a sarkoknál hajlítások során sokkal könnyebben lép fel az anyagfáradás jelensége, és nagyfrekvenciás áramköröknél az ívelt kanyarulatok használatával javul a jel-zaj viszony. [8]



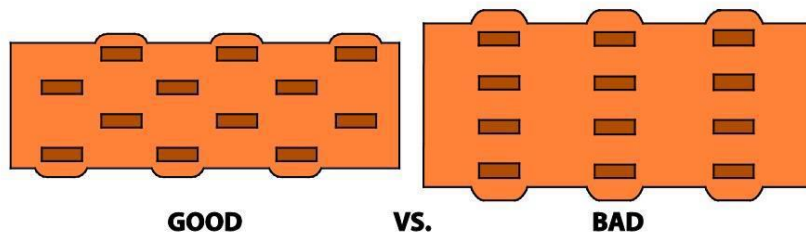
4.2.1 – Hordozók kialakítható vezetékezés típusok

A vezeték szélességének hirtelen megváltozása sem előnyös. A hajlítási területeken törekedjünk az állandó vezeték szélességre és vastagságra. Azon helyeken, ahol hirtelen változik meg a vezeték szélessége, ott idővel könnyebben fárad el a réz. Ennek elkerülésére kúposan elvékonyodó átmenet ajánlott. [8]



4.2.2 – Vezetékezés szűkítése [8]

A korábban említett hordozó vastagság fontossága miatt multi layer esetben figyelembe kell venni az egyes rétegek réz vezetékékezeinek elhelyezkedéseit. Fontos betartani azt a szempontot, hogy egy réteg két oldalán lévő vezető sávok ne egymás fölött haladjanak. A hajlítás során így kisebb mechanikai feszültség lép fel a hordozóban, vezetékben, illetve nem utolsó sorban a teljes hordozó réteg vastagság is csökken. [9]



4.2.3 – Hordozó belül kialakított vezetékékezek elhelyezése [9]

3) A szenzor hőmérséklet érzékelésére szolgáló eszköz kiválasztása

Az első feladat a hőmérsékleteloszlás érzékelő kártyához legmegfelelőbb, hőmérséklet mérésére alkalmas alkatrész megtalálása volt. A választás egy 0603-as tokozású szilíciumdiódára (1N4148) esett a már meglévő érzékelő kártyához hasonlóan. A hőmérsékletet a dióda nyitófeszültségének hőmérséklettől való függésének ($2\text{mV}/^\circ\text{C}$) segítségével mérjük. A dióda egy hőmérő cél IC-hez képest jelentősen kisebb területet foglal el, a méretéből adódóan a hőkapacitása is kisebb, ezáltal kisebb időállandó érhető el. Egy chip méretű hőmérsékletmérő IC beültetése (COB megvalósítás esetén a bondolás megvalósítása, stb.) a kártyára jelentősen bonyolultabb folyamat, mint az általunk választott alkatrészé. Költségeket tekintve is

kedvezőbb, nagyságrendekkel olcsóbb a dióda. Kevesebb kivezetésnek köszönhetően jelentősen egyszerűbb lesz később az NYHL megtervezése, ezáltal kisebb a valószínűsége a hibának tervezés során. A kevesebb vezetősáv által nő a hőmérséklet érzékelésre fordítható aktív felület. Azért a 0603-as tokozás esett a választás mérete (1.6mm x 0.8mm) még alkalmas kézi beültetésre is. [7]

4) A hordozótípus kiválasztása

Az alkalmazott hordozótípus kiválasztásánál az elsődleges szempont a minél kisebb időállandó elérése. A korábbi kártya 0.2mm vastagságú FR4 hordozó volt, melynek időállandója 24-25 szekundumra adódott. Az újonnan választott hordozótípus a poliimid, mivel az FR4-hez képest jelentősen vékonyabb réteg hozható létre – akár 25 mikron is – és a PET-hez képest forrasztható és jobb a hőmérséklet tűrése. [7]

Ahhoz, hogy az eszköz megfelelően tudja érzékelni a mérendő áramkör hőmérséklet eloszlását a hőmérsékletérzékelő kártya felületnek párhuzamosan kell állnia a mérendő felületre. A teljesen flexibilis felépítés esetén ez nem lenne megvalósítható (elhajlana), ezért merev-flexibilis (rigid-flex) felépítésű áramkörre van szükség. Abban az esetben, ha a merev rész csak az áramkör két végén lenne kialakítva, akkor szükség lenne még egy szerkezetre, ami kifeszíti a flexibilis részt. Ennek egy megoldása, ha maga a flexibilis hordozó egy merev keretet kap, és ebben lenne kifeszítve. [7]

5) Az érzékelő pixel mintázat kialakítása

A sugárzott hő elnyelésére mátrix rendben elhelyezett pixelek szolgálnak. Ezek felépítésének megtervezéséhez figyelembe kellett venni, hogy minél kisebb legyen a laterális hővezetés, azaz egy pixel hőmérséklete minél kevésbé befolyásolja a többi hőmérsékletét (crosstalk effektus), könnyen megvalósítható legyen a huzalozás, minél kisebb időállandó legyen elérhető. Ezeket a követelményeket figyelembe véve a következő megvalósítási terv született meg. A pixelek felületét réz borítja, az egyes pixelek között kivágás lesz kialakítva, mely megakadályozza a hővezetést a többi pixel között, az érzékelő dióda a pixelek sarkaiba lesznek elhelyezve, hogy a diódához vezető vezetékvezetések ne vágják ketté a pixel egybefüggő réz felületét, és minden egyes pixel mérete 5x5 mm lesz. Az ok, amiért egy pixel méretét 5x5 mm méretűre lett választva az az, hogy abban az esetben, ha kisebb lenne, csökkenne az aktív felület, ezáltal kevesebb sugárzott hőenergiát tudna elnyelni, és egy bizonyos méret alatt nem hozna további javulást az időállandó szempontjából – mint az már korábbi analitikus

számításokból látható volt. Nagyobb pixelméret esetén pedig megnő a térfogat, ezáltal a hőkapacitás is, mely az időálló növekedésével jár. [7]

6) Tervezés során alkalmazott szabályok

A tervezést megelőzően mindig szükséges tervezési szabályok – design rules – lefektetésére. Ehhez egy olyan nyomtatott huzalozású lemezgyártó céget kellett találni, aki képes rigid-flex NYHL konstrukciók gyártására. Ez azért fontos lépés, mivel minden egyes gyártónak saját tervezési szabályai vannak, saját felhasznált alapanyagai. Magyarországon az Auter Kft. volt az egyetlen cég, amit találtunk, mely foglalkozik rigid-flex nyomtatott huzalozású lemezek gyártásával. A cég által meghatározott tervezési szabályok a következők:

- legkisebb vezetés szélesség 8 mil
- legkisebb szigetelési távolság 8 mil
- az NYHL kontúrvonalától minimum 0.4 mm-es távolságban ne legyen vezeték, via vagy alkatrész kivezetés
- legkisebb furat átmérő 0.2 mm
- poliimid vastagság 25 mikron
- rézréteg vastagság 18 mikron
- rézbevonat vastagság a furatban 25mikron (tervezéskor figyelembe kell venni a furat átmérő esetén) [13]

7) Layer stack megtervezése

A hőmérsékleteloszlást érzékelő kártyához olyan rigid-flex struktúrát kellett kitalálni, mely lehetővé teszi az eddigi időálló csökkenését, melyet a legvékonyabb flexibilis résszel lehet elérni, olcsó legyen a gyárthatósága, egyszerű legyen megtervezni, illetve a felépítését tekintve kívül merev keret, középen flexibilis rész legyen. A legkézenfekvőbb megoldás a 4 rétegű merev rész két oldalas flexibilis résszel lett volna. De mivel az áramkör bonyolultsága nem indokolta, hogy szükség legyen 4 rétegű kialakításra, így a költségeket feleslegesen növelte volna ez a felépítés, ezen felül hátrány lett volna még, hogy a hőmérsékletérzékelő pixeleket tartalmazó flexibilis réteg nem a top layer lenne. [7]

A másik célszerű megoldás a két oldalas merev és egy oldalas flexibilis felépítés. Ezen esetben a tervezés vált volna nehezkesebbé és a vezetékvezés miatt a pixelek is nagyobb távolságra kerültek volna egymástól, mivel a diódákhoz vezető vezetékek ugyan azon az

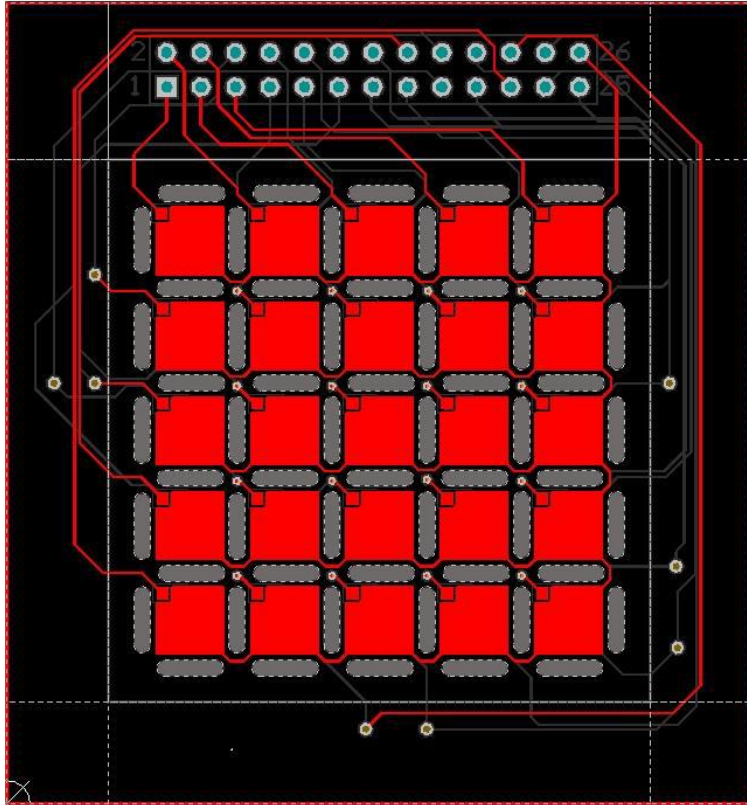
oldalon lettek volna kialakítva, mint a réz felületű pixelek. Nagy előnye lett volna ennek a megoldásnak a relatíve olcsó gyárthatóság, és hogy a pixeleket tartalmazó réteg a top layer. [7]

A megoldás a két felépítés kombinációja lett. Háromrétegű merev rész és két oldalas flexibilis rész, furatfémezett furatokkal a flexibilis részen is. Ennek a felépítésnek a gyártása kisebb költséggel jár, mivel a merev rész kialakításához egy egy-oldalas FR4-es hordozóra van szükség (4 réteg esetén 2 darab FR4-es hordozóra lenne szükség), a további két vezető réteget a merev részen is jelen lévő poliimid hordozó biztosítja. A minél kisebb időállandó eléréséhez a flexibilis résznek a lehető legvékonyabbnak kell lennie. Ezért a gyártó által legvékonyabb poliimid hordozóra és legvékonyabb réz rétegre esett a választás. Az időállandó csökkentés érdekében nem kerülne fedőréteg (cover layer) a flexibilis rész egyik oldalára sem, azonban gyárthatósági okok miatt szükséges volt a flexibilis rész alsó oldalára felvinni a cover layert. [7]

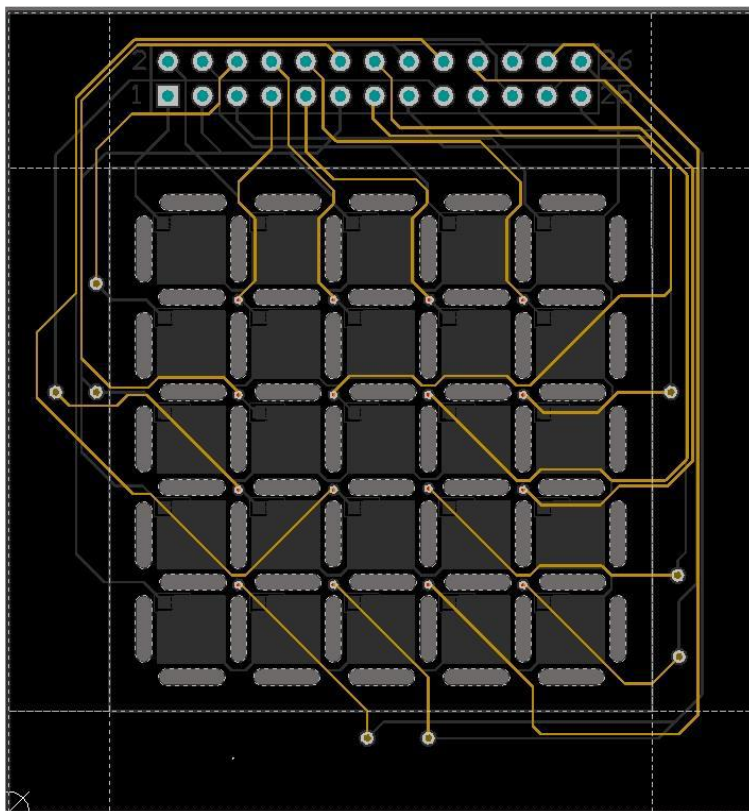
A kártyához választott felépítés a következő:

- a merev részen 3 vezető réteg
- a flexibilis részen 2 vezető réteg
- az FR4-es 1.55 mm vastag hordozó egyoldalú, ebben az esetben a réz vastagság 35 mikron
- a poliimid fólia hordozó 25 mikron vastag és két oldalú, és ebben az esetben a réz réteg vastagsága 18 mikron
- a furatokhoz furatfémzés szükséges
- a merev rész mindkét oldalára forrasztásgátló maszk kell
- feliratok mind két oldalon szükségesek [7]

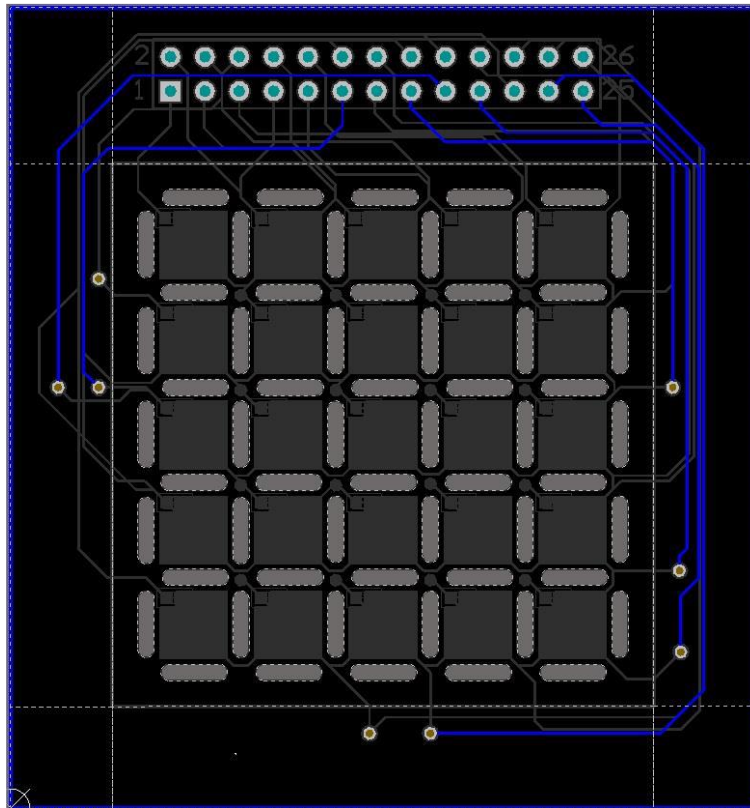
Az rigid-flex áramkör megtervezéséhez több CAD szoftver is lehetőséget biztosít, ilyen például az Altium designer, Cadance OrCad és a Mentor Graphics Expedition. A tervezéshez az Altium designer szoftvert választottuk. A tervezés végén létrejött CAD projekt fájljai még nem alkalmasak a gyártásra, ezért a különböző rétegekből generálni kellett úgynevezett gerber fájlokat, melyek a gyártósor számára a gyártandó termékről feldolgozható információkat tartalmaznak, illetve képesek a gyártósor gépeit vezérelni.



4.7.1 – Rigid-flex kártya top réteg [7]



4.7.2 – Rigid-flex kártya flex bottom réteg [7]



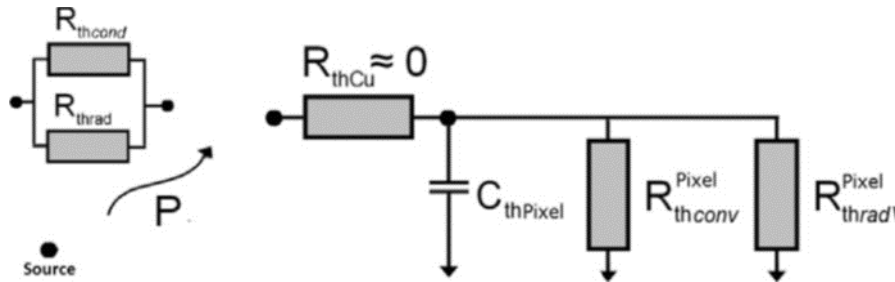
4.7.3 – Rigid-flex kártya bottom réteg [7]

A képeken a piros négyzetek a réz felületek, az egyes pixelek, a szürke ovális alakzatok a pixelek közti kivágások az „áthallás” csökkentése érdekében, a piros, sárga és kék huzalok pedig maguk a vezetékezések a middle és bottom rétegeken. Az áramkörhöz való csatlakozás a kártya tetején található, 1-től 26-ig számozott tükkesoron keresztül lehetséges. Az érzékelő kártya a 26-os tükkéje a közös földpont. Ezen földpont huzalozása az egyes pixelekhez fésűs elrendezéssel lett megvalósítva. A jobb oldali oszlop pixelei függőlegesen vannak összekötve, majd balra haladva kapcsolódnak a többi pixelhez. A diódák katódja a pixelhez direct connection-el van megvalósítva így javítva a hőmérséklet áramlást a dióda felé. A dióda anódjai csatlakoznak a tükkesor kivezetéseihez. [7]

V. A hőmérséklet-eloszlást érzékelő kártya időállandójának analitikus számítása

Az analitikus számítások elvégzésének egyszerűsítése érdekében készült egy excel fájl, mely a már korábban említett termikus modell alapján analitikus számítások során kiszámolja, hogy adott távolság és hőmérséklet esetén hogy változik az érzékelő pixel időállandója a pixelméret függvényében. A 0.2 mm-es FR4 hordozón kialakított érzékelő kártyáról már rendelkezésre állt számítási eredmény, de az új rigid-flex kártyához még nem, ezért a

rendelkezésre álló excel fájtt kellett olyan módon átalakítani, hogy az képes legyen az új kártya modellje alapján is helyes és értékelhető eredményt kiszámolni. Egy mélyebb elméleti vizsgálat során kiderült, hogy a rigid-flex kártya termikus modellje nem tér el a már korábban megalkotott modelltől, ezért csak az új érzékelő paramétereinek értékeit volt szükség kicserélni. Ilyen paraméterek a poliimid fólia vastagsága, fajlagos hőkapacitása, hővezető képessége, stb.



5.1 - A hőmérséklet érzékelő kártya egyszerűsített termikus modellje [3]

A számításához felhasznált képletek és egyenletek a következők:

A kártya felületéről sugárzással és hőszállítással (konvekció) távozik a hő a környezet felé. Az R_{thcond_p} és az R_{thrad_p} egyenletei a már korábban említett módon számolhatók, de itt is megemlítésre kerülnek.

$$R_{thconv_p} = \frac{1}{h \cdot A_{kártya}}$$

$$R_{thrad_p} = \frac{1}{A_{kártya} \cdot \varepsilon_{FR4} \cdot 4\sigma \cdot (T_{kártya}^3 - T_{környezet}^3)}$$

Ahol $h=10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ a hőátadási együttható értéke (szabad konvekciót feltételezve), $A_{kártya}$ pedig a pixel felülete, $\varepsilon_{FR4}=0,8$, $\sigma=5,672 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, a hőmérsékletek pedig Kelvinben értendők.

Ezt követően, ahogy a modell is mutatja, az R_{thcond_p} és az R_{thrad_p} értékeinek repluszával megkapható kártya által sugárzással (radiációval) és hőszállítással (konvekcióval) leadott hőmennyiséget az adott feltérben.

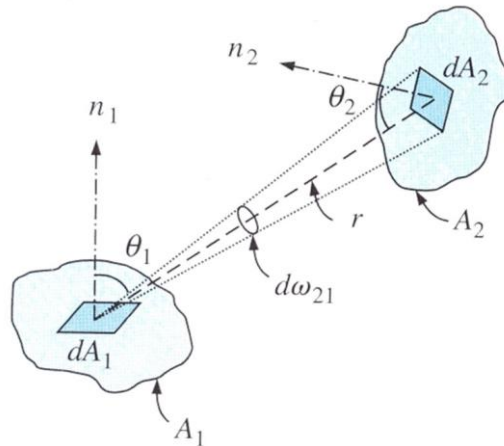
$$R_{th_rad_conv_p} = \frac{1}{\frac{1}{R_{thconv_p}} + \frac{1}{R_{thrad_p}}}$$

A forrás és a pixel közti sugárzásos hőátvitel kiszámításához szükség van a láthatósági együtthatóra, mely tisztán geometriai úton számolható. A láthatósági együttható azt mondja

meg, hogy két adott felület esetén, melyek adott távolságra vannak egymástól és adott szög alatt látszanak, az egyik hogy látszik a másik felől.

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} dF_{dA_1 \rightarrow dA_2} dA_2 dA_1 = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi S_{1-2}^2} dA_2 dA_1$$

5.2 – Láthatósági együttható kiszámítása képlettel



5.3 – Két végtelenül kicsi felület elhelyezkedése [1]

A sugárzásos hőátvitel a láthatósági együttható ismeretében a Stefan-Boltzman törvényből meghatározható. Sugárzásos hőátvitel egyszeri hőmérséklet szerinti deriválásával meghatározható két felület közötti sugárzásos hőátvitel hőellenállása (R_{thrad}).

$$R_{thrad} = \frac{dT}{dQ_{12}} = \frac{1}{\frac{4\sigma \cdot (T_{forrás}^3 - T_{kártya}^3)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \cdot \varepsilon_1} + \frac{1}{A_1 \cdot F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \cdot \varepsilon_2}}}$$

A Q_{12} a már korábban felírt két felület közötti hőátadás egyenlete, mivel az egyes felületeket nem foghatjuk fel abszolút fekete testként. A végeredményhez szükséges a levegő konduktív hőellenállás értéke, mely a következőképpen számolható.

$$R_{thcond} = \frac{L_{levegő}}{A_{pixel} \cdot \lambda}$$

Ahol az L mindig az éppen aktuális távolság a forrás és a pixel között, az A_{pixel} a pixel felülete, $\lambda=0,0219 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ pedig a fajlagos hővezetési tényező. Ennek a két értéknek kell újfent a repluszát venni, ahogy a modell is mutatja.

$$R_{th_rad_cond} = \frac{1}{\frac{1}{R_{thcond}} + \frac{1}{R_{thrad}}}$$

A τ időállandó számításához már csak a C_{th_p} pixel hőkapacitása szükséges. Ez a kapacitás érték két részből tevődik össze, egyrészt a réz fólia hőkapacitásából, másrészt a hordozó poliimid fólia hőkapacitásából, tehát a teljes hőkapacitás a pixelre e két hőkapacitás összege.

$$C_{th_p} = c_{Cu} \cdot A_{pixel} \cdot L_{Cu} + c_{poliimid} \cdot A_{pixel} \cdot L_{poliimid}$$

A c_{Cu} értéke $3,395 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{s}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$, $c_{poliimid}$ értéke pedig $1,548 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot \text{s}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$, a réz vastagsága 18 mikron, a poliimid vastagsága pedig 25 mikron. Most már a termikus kompakt modell minden eleme ismert, tehát kiszámolható az időállandó a korábban is említett összefüggés alapján.

$$\tau = \frac{1}{-1 - \frac{R_{th_rad_conv}}{R_{th_rad_cond}}} \cdot \frac{1}{R_{th_rad_conv} \cdot C_{th_p}}$$

5.4 - A τ időállandó kiszámítását szolgáló képlet

VI. Rigid-flex kártya modellezése és szimulálása FloTherm-ben

Egy termék tervezése esetén a szimuláció rendkívül fontos, mivel nem mindig van lehetőség a kész terméken méréseket végezni, illetve adott esetben, ha a termék rendelkezésre is áll, nincs elegendő idő minden lehetőséget megvizsgálni mérésel. A szimulációk ebben segítenek, rövidebb idő alatt, gyors paraméter változtatás mellett képes megmutatni a termék működését, gyorsabb fejlesztést tesz lehetővé, illetve nem utolsó sorban összehasonlíthatóvá teszi a szimulációhoz készített modellt a valós termékkel, ezáltal karakterizálni képes a terméket. [6]

A flexibilis hőmérsékleteloszlást érzékelő kártya számára is szükség volt egy szimulálható modellre. A modell a Mentor Graphics FloTherm nevezetű CFD szoftverben készítettük el, mely kifejezetten termikus szimulációk elvégzésére alkalmas. Egy fontos szempont volt a modell megalkotását illetően, hogy a korábbi kártya modellel ellentétben most a teljes rigid-flex kártya lett modellezve, mivel ebben az esetben közelít a modell a legjobban a valósághoz. [6]

A képen látható sárga szín a poliiimid fóliát mutatja, melynek vastagsága 25 mikron, anyagi paramétereit egy a fóliát gyártó cég katalógusából származnak (lásd hivatkozás [12]). Hővezető képessége $0,12 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, sűrűsége $1,42 \text{ g/cm}^3$ illetve fajhője $1,09 \text{ J/(gK)}$. Fontos paraméter az emisszivitás, mely az alábbi esetben egyre lett választva. [6]

A feketével jelölt négyzetek a poliiimid felületén elhelyezkedő réz pixelek, melyek vastagsága 18 mikron, anyagi paramétereit a szoftver alapkönyvtárából elérhetők. Ahogyan a tervezett mérés során, a szimulációba is kerül a réz felületére fekete festék annak érdekében, hogy az emisszivitása még nagyobb legyen, ebben az esetben az értéke eléri a 0.95-öt. A modellben mérőpontokat kell elhelyezni annak érdekében, hogy a szimuláció során eredmény szülessen, ezek a mérőpontok a pixelek felületén található fehér keresztek. Az elrendezésük célja, hogy a különböző láthatósági együtthatójú pixelek időállandói összehasonlíthatók legyenek egymással. [6]

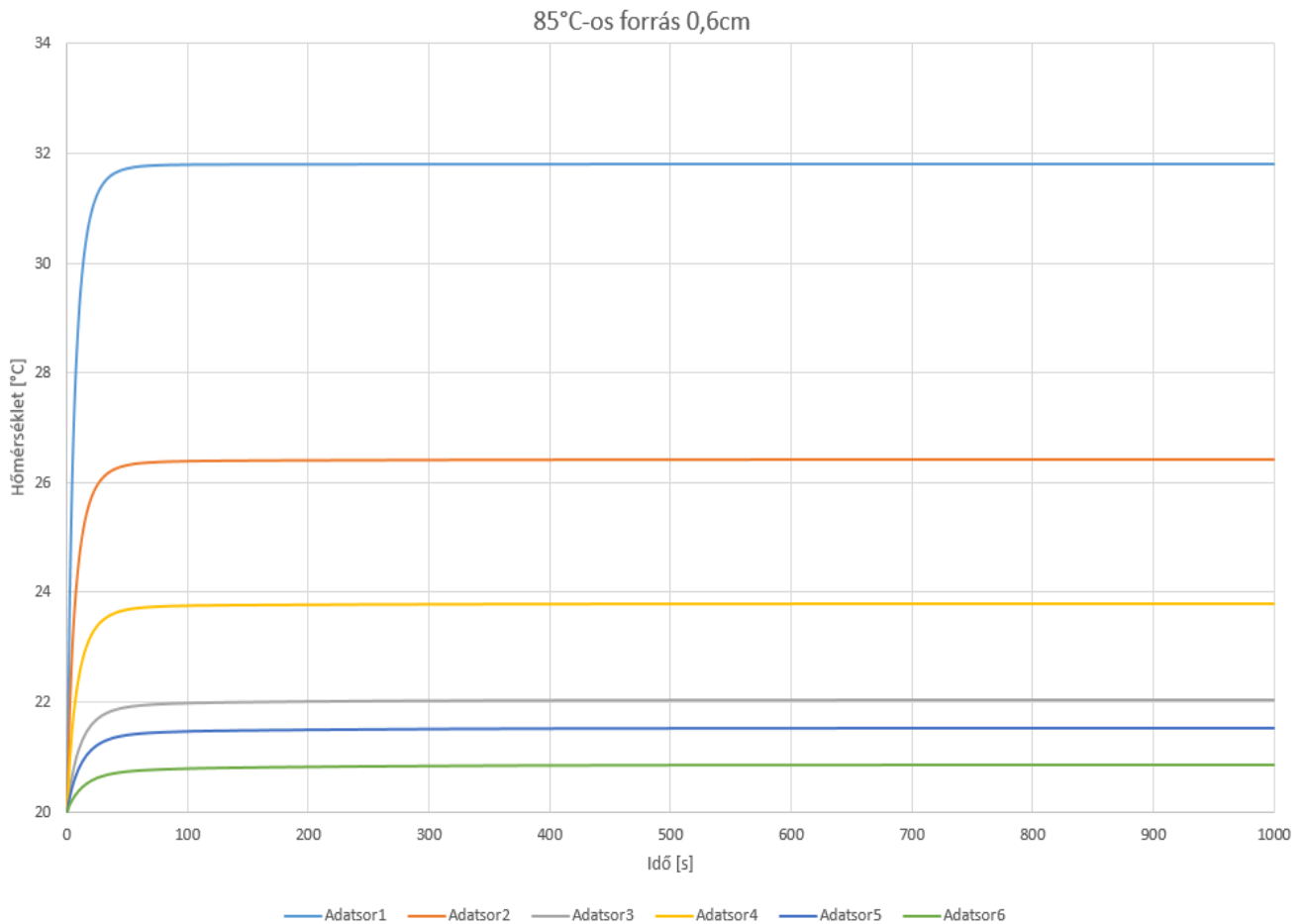
A réz felületen lévő téglalapok, a 0603-as méretkódú SMD diódák. [6]

A szimulációs környezet paramétereit is szükséges beállítani. Mivel az érzékelő kártyának a pixeljei kisebb részt a hőszállítás és/vagy hővezetés által melegednek fel, nagyjából a hőszállítás által, ami távoli infravörös sugárzással történik, igen fontos, hogy a program is számoljon ezzel a paraméterrel, ezért ezt külön be kell kapcsolni. Fontos továbbá, hogy ne csak állandósult időbeli szimulációk készüljenek a modelltől, hanem szükség van tranziens szimulációkra is, sőt, érdemlegesebb is, mivel a tranziens szimulációkkal, és később az analitikus számításokkal és mérésekkel az érzékelő kártya időállandója határozható meg. A modellt egy adott légtérben kell szimulálni, ezért annak paramétereinek megválasztása is kell, a légtér 1000 hPa nyomású, $20 \text{ }^\circ\text{C}$ fokos, mely átlagos szobalevegőnek számít. Még szükséges megemlíteni, hogy habár a szimulációs tér fix térfogatú, a falak nyitottak, mely azt jelenti, hogy a forrás kisugárzott hőmennyiségétől a tér levegője nem melegszik az időben. [6]

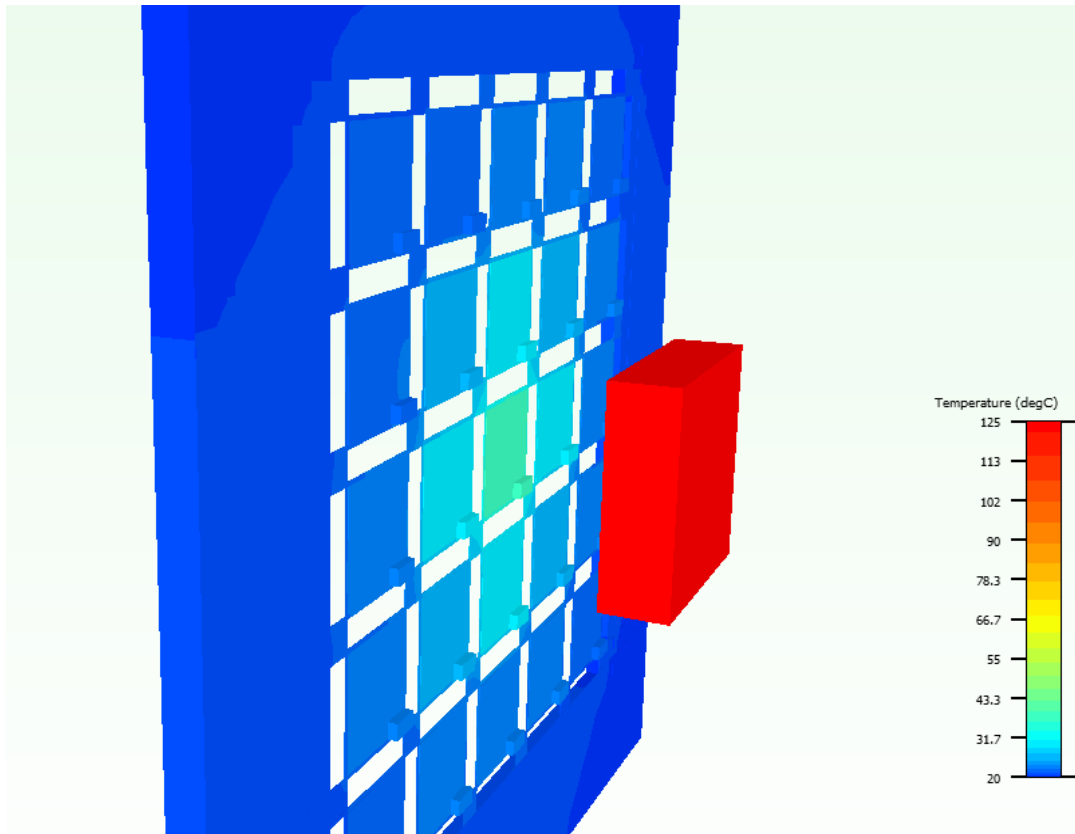
VII. Szimulációs és analitikus számítási eredmények összehasonlítása

Önmagában a szimuláció vagy analitikus számítás sosem elegendő arra, hogy végérvényes következtetéseket lehessen levonni a termékről, rendszerről, modelltől. A hőmérsékleteloszlást érzékelő kártyák modelljein szimulációk és számítások is futottak annak érdekében, hogy mind a kártyák, mind a szimulációs és számított eredmények összehasonlíthatók legyenek.

Mind szimulációk, mind számítások során több eset lett figyelembe véve. A paraméterek, melyek változók voltak a sugárzó forrás hőmérséklete és a forrás-kártya közti távolság. A hőforrás definiált hőmérsékletei 70 °C, 85 °C és 125 °C, a távolság a forrás és kártya (középső pixel felülete) között 0.6 cm és 1.5 cm. Egy szimuláció és egy számítás a forrás egy adott hőmérsékletén és adott távolságon fut, és minden esetben a pixelek hőmérsékletváltozása kerülnek felvételre az időben. Ez minden esetben egy exponenciális lecsengő változás, melyből számolható az időállandó, és később az időállandók összehasonlíthatók. [6]



7.1 - A mért pixelek hőmérséklet diagramja az időben egy szimuláció során [6]



7.2 - A kártya hőmérséklet eloszlása a szimuláció végén [6g]

Az elvégzett szimulációk és analitikus számítások eredményei összehasonlítva az előző 0,2 mm vastagságú FR4 hordozón megvalósított érzékelő eredményeivel az alábbi táblázatban láthatók.

		FR4 kártya szimulációs τ [s]	FR4 kártya analitikus τ [s]	rigid-flex szimulációs τ [s]	rigid-flex analitikus τ [s]
Hőmérséklet [°C]	70	15,9426	15,63	6,2822	6,2
	85	15,6903	15,19	6,0658	6
	125	14,6869	13,95	5,6374	5,46

7.3 - Az időállandók 0,6 cm-es forrás pixel távolság esetén [6]

		FR4 kártya szimulációs τ [s]	FR4 kártya analitikus τ [s]	rigid-flex szimulációs τ [s]	rigid-flex analitikus τ [s]
Hőmérséklet	70	22,5163	22	8,9977	7,75

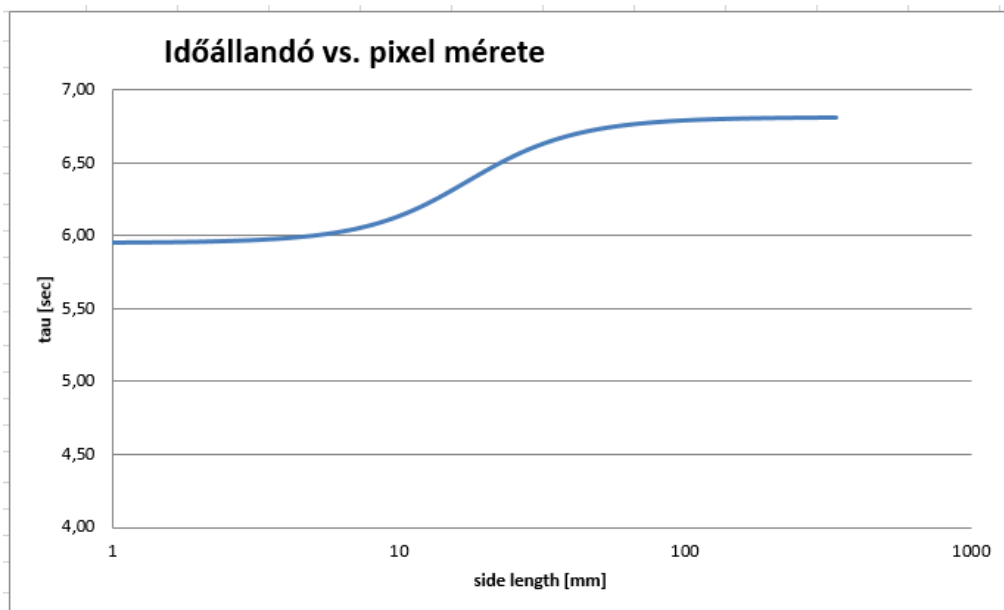
[°C]	85	22,1392	21,74	8,5867	7,67
	125	21,4907	21	8,0256	7,4

7.4 - Az időállandók 1,5 cm-es forrás pixel távolság esetén [6]

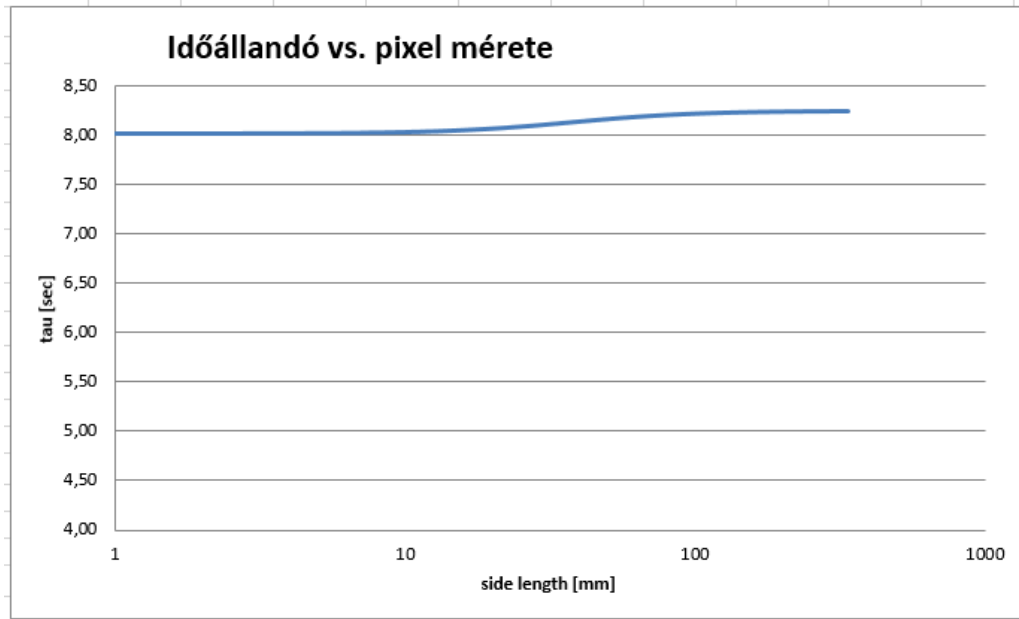
Az értékekből leolvasható, hogy az egyes kártyák szimulált és analitikus úton számolt időállandói azonos nagyságrendbe esnek, nem sokban térnek el egymástól, ebből pedig az a következtetés vonható le, hogy az analitikus számításhoz használt egyszerűsítéseket és elhanyagolásokat alkalmazó modell megfelel arra, hogy elég pontosan meg lehessen határozni adott paraméterek mellett a pixel időállandóját. [6]

Az eredményekből egyéb következtetések is levonhatók, többek között hogy az új rigid-flex kártya időállandója jelentősen kisebb, mind a 0.2 mm-es FR4 kártyáé, a forrás-kártya távolság növekedésével az időállandó is növekszik, és a hőmérsékletnövekedéssel az időállandó csökken. A flexibilis kártya időállandó javulása a sokkal vékonyabb hordozónak köszönhető, ahogy az várható volt, mivel ezáltal a kártya hőkapacitása majdnem a tizedére esett vissza, tehát gyorsabb a reakciója a gyors hőmérsékletváltozásra. [6]

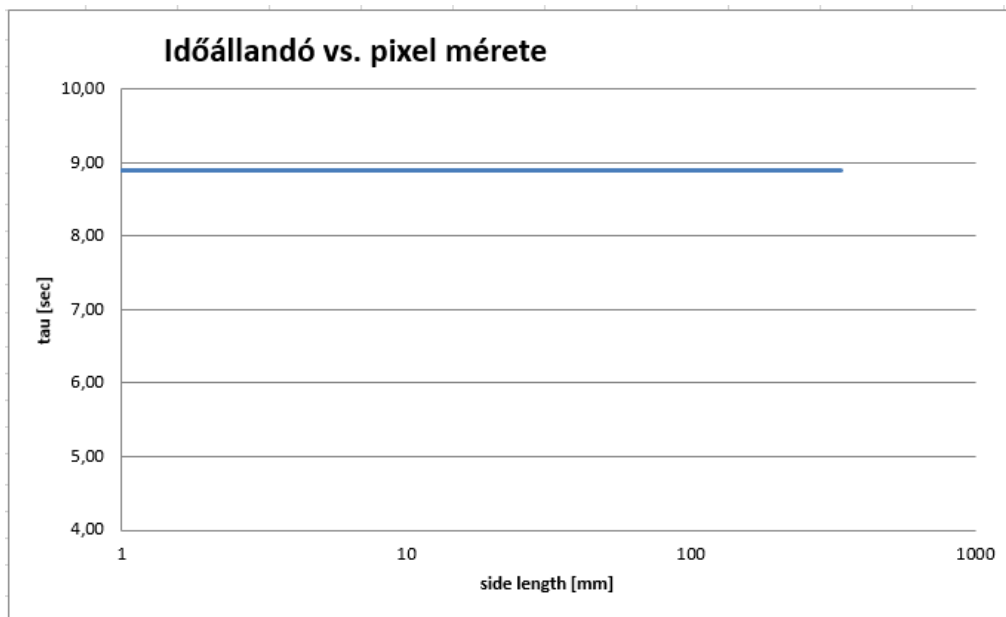
Azt feltétlenül meg kell jegyezni, hogy az időállandó növekedés a távolság növekedés függvényében nem a végtelenbe tart, egy adott ponton túl nem nő tovább. Ez a pont, vagy intervallum akkor van, mikor a forrás élhossza már nem összemérhető a forrás-kártya távolsággal (nagyságrendben nem mérhető össze). Ez a pont analitikus számításokkal 1 cm-es forrás élhossz mellett körülbelül 10 cm-re adódott.



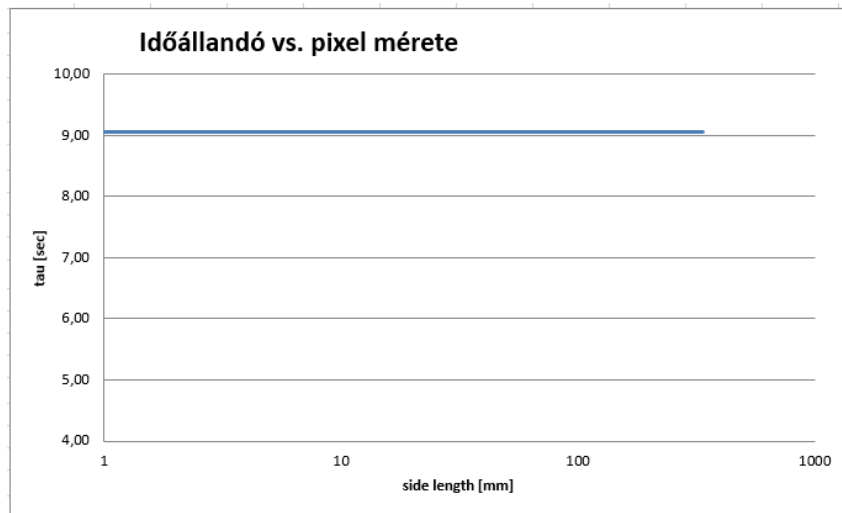
7.5 – Időállandó diagram 0.6 cm forrás-pixel távolság esetén



7.6 – Időállandó diagram 2 cm forrás-pixel távolság esetén

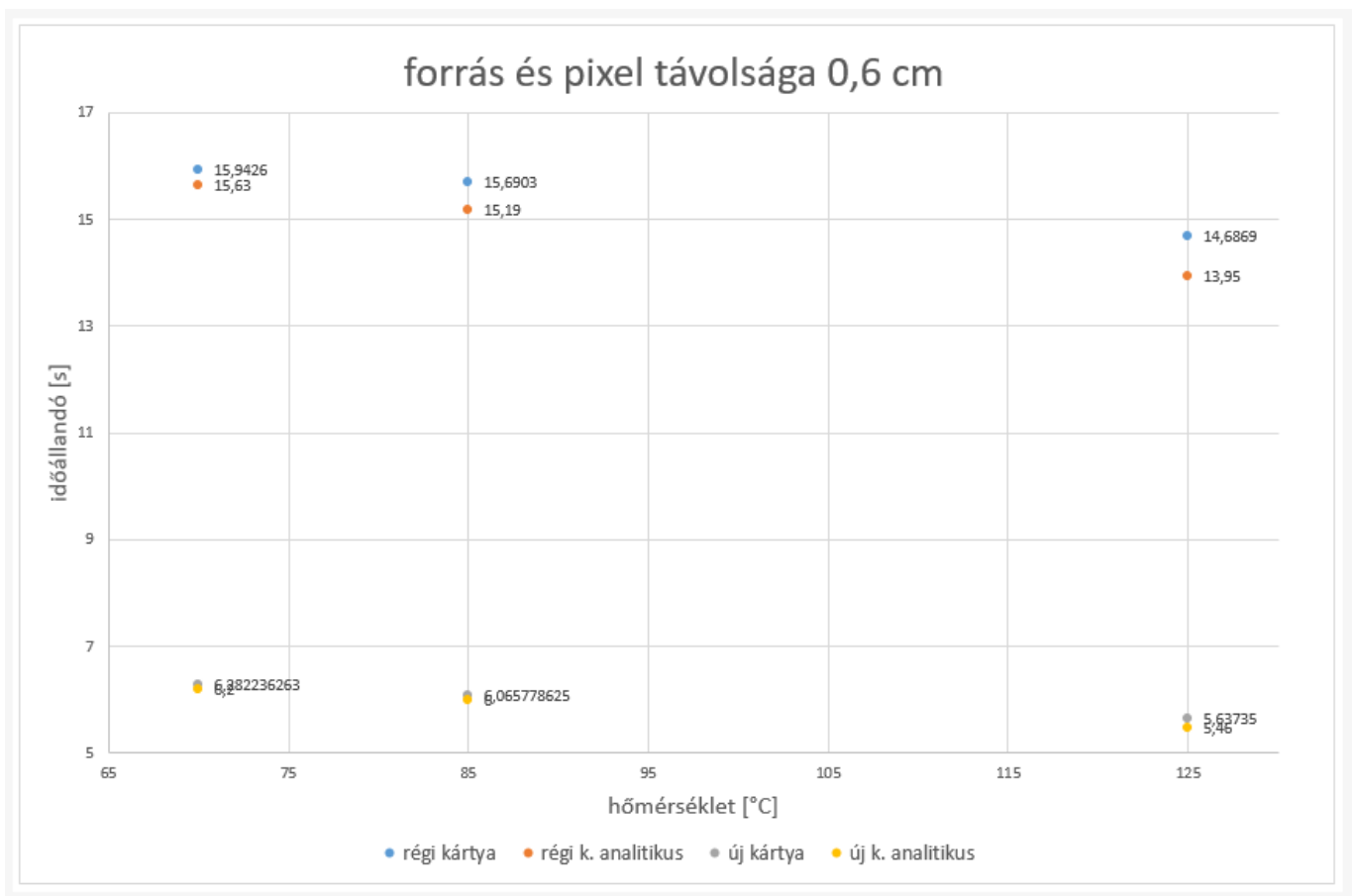


7.7 – Időállandó diagram 10 cm forrás-pixel távolság esetén

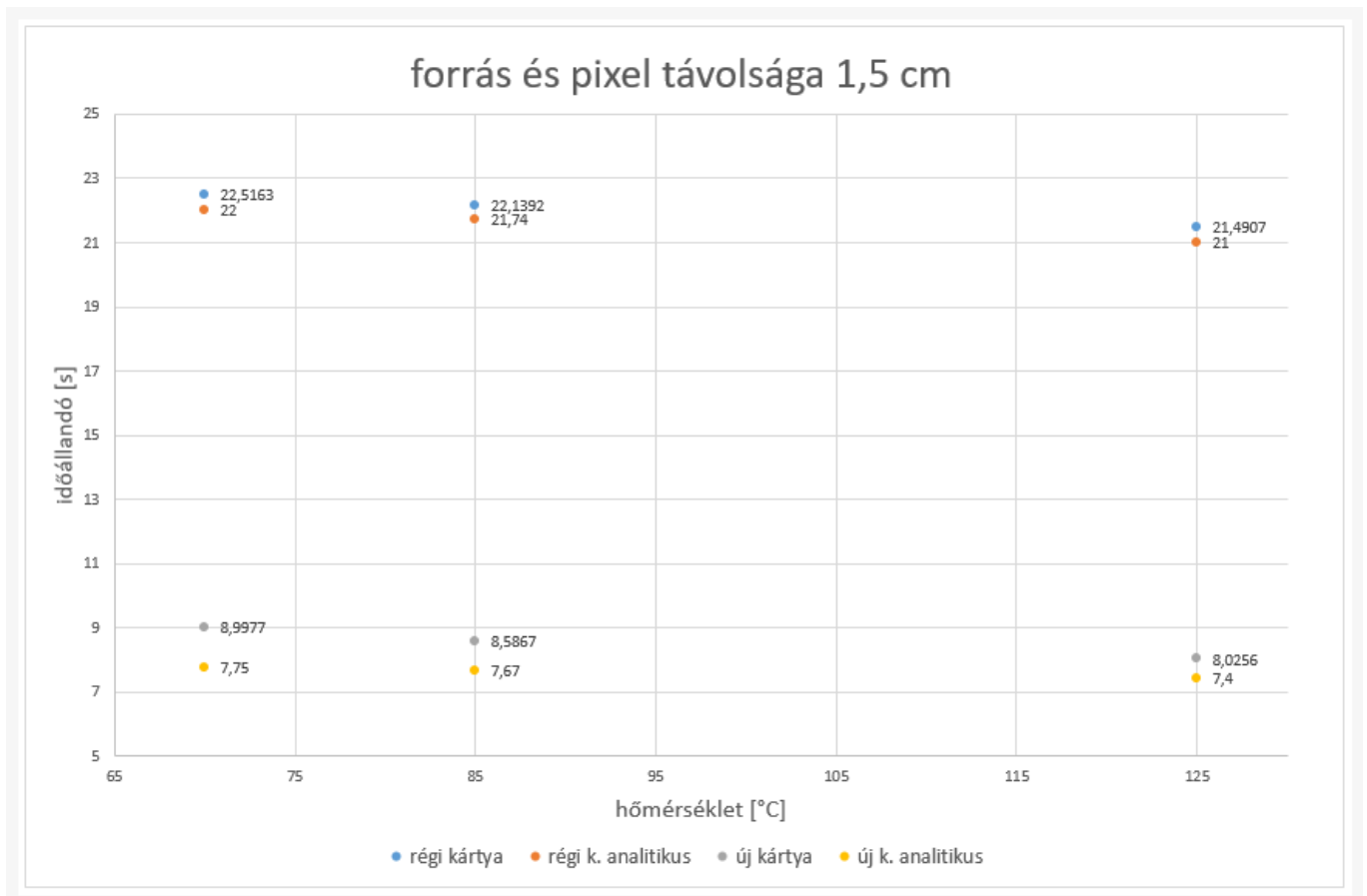


7.8 – Időállandó diagram 1 méter forrás-pixel távolság esetén

Az alábbi két diagramon szemléletesebb a táblázatban szereplő eredmények sokasága. A diagramon szereplő régi kártya név a 0.2 mm vastag FR4hordozón kialakított szeparált pixeles kártyára utal, míg az új kártya a rigid-flex kártyára.



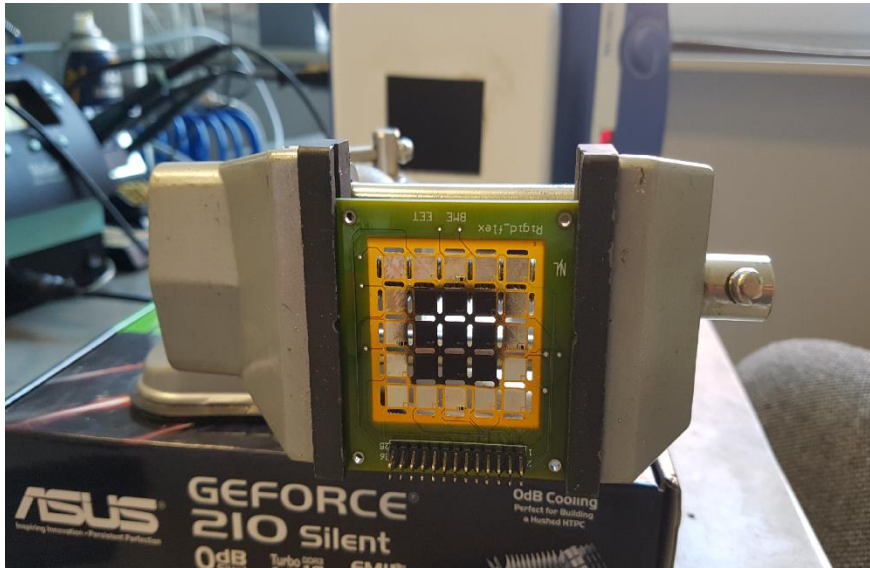
7.9 - Az időállandók 0.6 cm-es forrás pixel távolság esetén



7.10 - Az időállandók 1,5 cm-es forrás pixel távolság esetén

VIII. A rigid-flex hőmérsékleteloszlást érzékelő kártya előzetes mérési eredményei

Az elkészült flexibilis hőmérsékleteloszlást érzékelő kártyán előzetes mérések folytak, melyek teljes karakterizálásra és precíz eredményekre még nem alkalmasak, azonban ebben az esetben az időállandó elég jó pontossággal meghatározható és összevethető a számolt és szimulált eredményekkel. A mérés előtt a kész rigid-flex kártya egyes pixeleire fel lett forrasztva a 0603-as dióda, fel lett forrasztva a tűskesor, ami a csatlakozási pontokat biztosította, illetve a középső 3x3-as pixel mátrix le lett fújva fekete matt festékkel az emisszivitás növelése érdekében. [6]

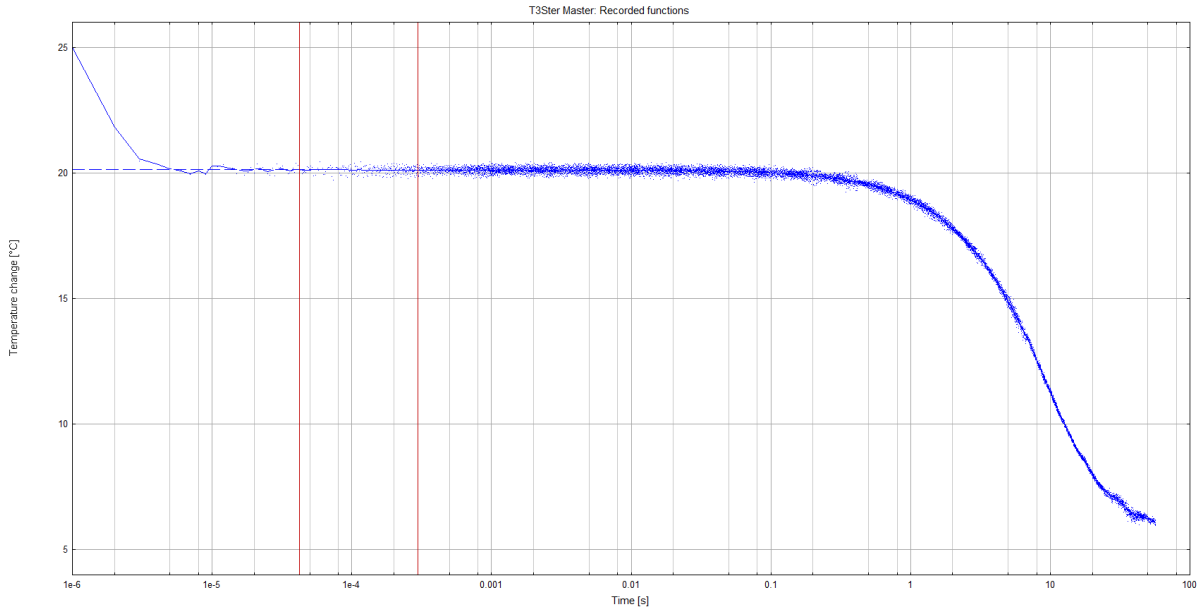


8.1 - A flexibilis kártya befogva és előkészítve a mérésre [6]

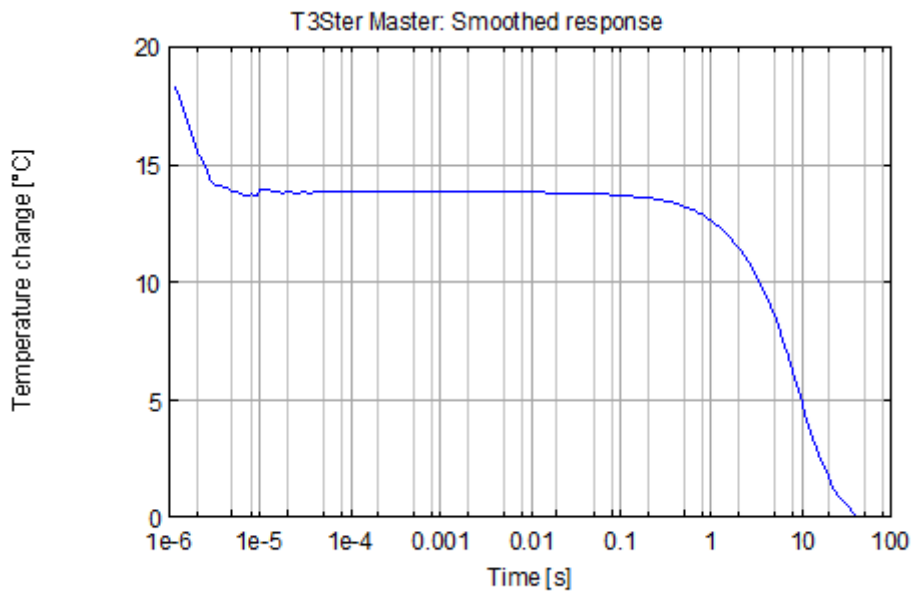
A forrás a mérés során nem egy disszipáló teljesítmény tranzisztor volt, ahogy a szimuláció során, hanem a fűtő lap, melynek hőmérsékletét 85°C-ra lett beállítva. Mérés során több probléma is adódott. [6]

Az elsődleges gondot az okozta, hogy a sugárzó forrás egy fűtőlap volt, melynek mérete és természete eltért a szimulált modell forrásától, illetve a fűtőlap működését tekintve nem volt képes állandó hőmérsékletet tartani. Ez a fűtőlap működési elvének köszönhető, mivel mikor eléri a beállított hőmérsékletet, a fűtőlap kikapcsol, és majd csak akkor kapcsol vissza, mikor egy adott hőmérséklet alá hűlt vissza a fűtőlap. Emiatt a hőmérséklet ingadozik. A következő probléma a mérőtérrel volt, mert a mérési összeállítás közvetlen környezetében a működő számítógépek, illetve emberi tevékenységből származó mozgás okoztak annyi légmozgást és plusz hőszugárzást, hogy a mérést ez befolyásolta. A harmadik számottevő gond pedig az előzővel összefügg, tehát a méréstér környezetében lévő plusz hőforrások, légmozgások következtében kimutatható tüskék jelentek meg az idődiagramon. Ez a jelenség az előző kártyák esetében nem volt tapasztalható, mivel az időállandójuk jóval nagyobb volt. Az új rigid-flex kártyát a nagy érzékenysége miatt nehéz volt pontosan mérni, mely akár előny is lehet, mivel már a legkisebb hőforrásra is reagál, és rendkívül gyorsan. [6]

A mérés során a kártya és a forrás közti távolság 2 cm volt, a hőforrás a korábban említett 85 °C-ra lett beállítva. Több mérés is zajlott a fent tárgyalt problémák miatt, illetve a nagy zajérzékenység miatt. [6]



8.2 - A flexibilis kártya közepén lévő pixelhez tartozó mérési eredmény [6]

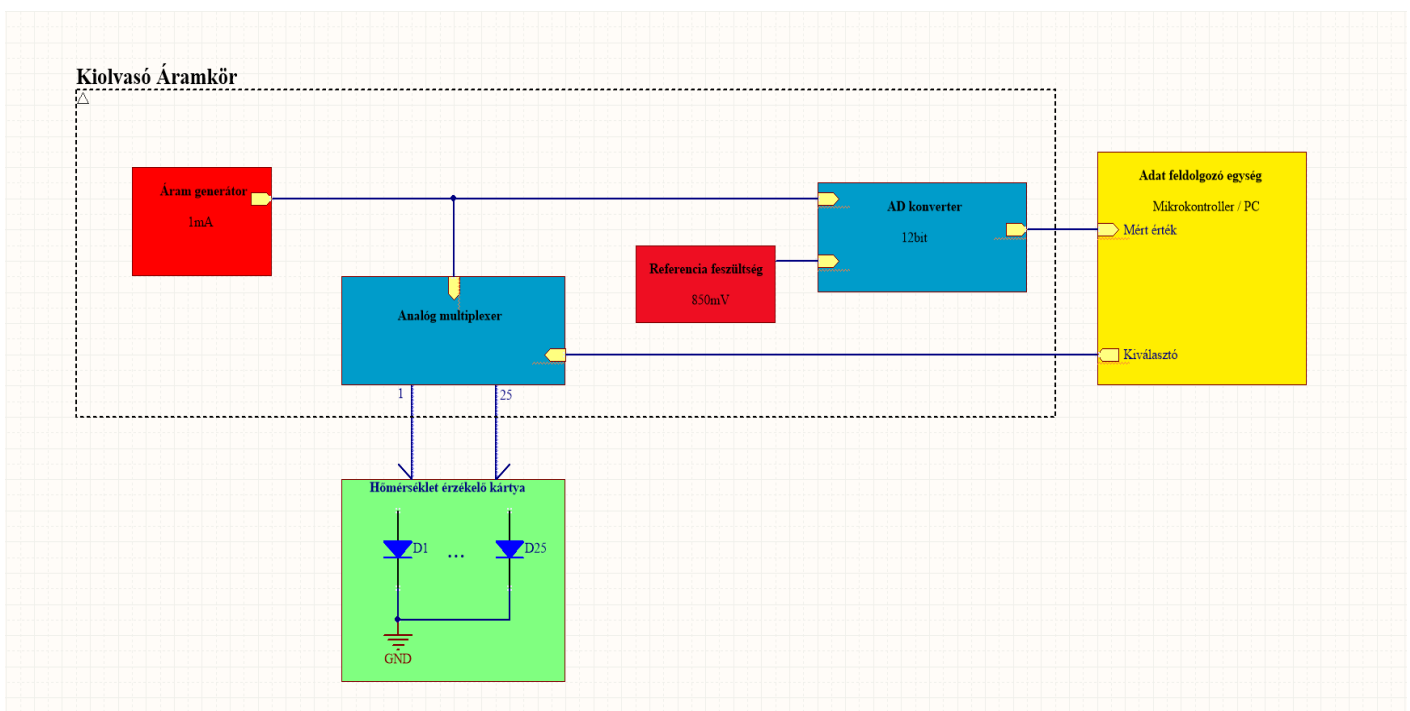


8.3 - A flexibilis kártya közepén lévő pixelhez tartozó mérési eredmény kiátlagolva [6]

A fent látható diagramok megfelelőnek bizonyultak a további feldolgozásra (átlagolás) és kiértékelésre. A mérési eredményből meghatározható, hogy a rendszer időállandója 9-9.5 s, ami teljesen elfogadható eredmény annak ellenére, milyen nehéz is volt kimérni a fokozott érzékenység miatt. Ami még öröme ad okot, hogy a szimuláció és analitikus számítás során a 85 °C-os forrás és 1.5 cm távolság esetén az időállandó 8-8.5 s volt, ami azonos nagyságrendben van a mért időállandóval. A mért időállandó magasabb értéke a plusz 0.5 cm-es távolságnak és az eltérő szimulációs és mérési környezetnek tudható be. [6]

IX. Jövőbeli tervek

A szimulált és analitikusan számított eredmények validálásához, szükség van egy kiolvasó áramkör megtervezéséhez. Ez a kiolvasó áramkör univerzális, azaz bármely áramgenerátoros előfeszítést igénylő szenzorkártya kiolvasására alkalmas. Egy analóg multiplexer látja el a mérendő egység, jelen esetben a pixel kiválasztását. Az áram generátor segítségével állandó áram folyik át a diódán ez által meghatározható a nyitó feszültsége az adott áramerősség mellett. A multiplexer kimenetén lévő feszültség mérésével meghatározható a nyitófeszültség. Mivel az analóg multiplexer mOhm nagyságrendű ellenállással rendelkezik (ezek a MOS tranzisztorok csatorna ellenállásából adódik), így az ez által okozott mérési hibától el lehet tekinteni. A mérés analóg-digitál konverzió segítségével valósul meg. A mérési pontosság jelentősen növelhető egy megfelelően választott referencia feszültséggel. A használt dióda nyitófeszültsége 670mV körül van 20°C-on. A dT 80°C-ra lett választva, ezért egy 160mV-os tartományt kell mérni. Ebből adódóan 850mV-os referencia feszültség ideális. Egy 12bit-es felbontású AD konverter használatával így körülbelül 0.2°C-os pontosság érhető el.



9.1 – A rigid-flex kártyához kialakítandó kiolvasó áramkör rendszerterve

Az kiolvasó áramkör tervezése folyamatban van és előzetes tervek szerint az áramkör egy Cypress CY8CKIT-059 PSoC programozható rendszerchip eszköz alkalmazásával kerül kialakításra. A mért értékeket soros RS-232 protokollal, USB interfészen keresztül továbbítja a PC felé.

X. Összegzés és az érzékelő kártya tovább fejlesztési lehetőségei és lehetséges alkalmazási területei

Összegzésként összefoglalva elmondható a flexibilis érzékelő kártyáról, hogy a várt eredményeknek - mely az volt, hogy az időállandót jelentősen visszaszorítsuk (5..10 másodpercre) – megfelelően teljesített, mint szimulált, mint mért esetben. Sikerült a korábban túl nagy időállandó értéket leszorítani 10 másodperc környékire, mindez annak köszönhető, hogy a kártya hőkapacitása jelentősen lecsökkent. Az előzetes mérés pedig bebizonyította, hogy valóban képes hőmérsékletérzékelésre, folytatódhatnak a további mérések, bemérések, verifikálások.

A bemutatott rigid-flex érzékelőkártyák alkalmazási területeket tekintve számítógép házak illetve rack szekrények áramköri kártyái közé helyezhetők el, így képesek megtalálni a fő disszipáló forrásokat, és ennek köszönhetően optimalizálható lesz az áramköri hordozón az alkatrészek elrendezése, vagy hűtési rendszer kialakítása annak érdekében, hogy hatékonyabban működhessen, nem is beszélve az élettartam meghosszabbításáról. Emberi jelenlét ellenőrzésre is felhasználható egy helységben, tovább fejlesztve a kártyát akár áttetsző (réz helyett vezetőpolimer alkalmazásával) öntapadós matricaként felragasztható lesz egy falra vagy tükörrre, ezzel is elrejtve a szem elől. Nem utolsó sorban, azokban az IoT eszközökbe, melyek nem rendelkeznek aktív hűtési rendszerrel, a set-top boxokba vagy a rack fiókos rendszerekbe elhelyezve a rigid-flex érzékelő kártyákat modellezhető és vizsgálható lesz a hőátadás mechanizmusa. [6]

XI. Felhasznált irodalom

- [1].Dr. Bognár György, A mikroelektronika egyes termikus problémáinak kezelése, Doktori (Ph.D.) értekezés, BME-EET, (2009)
- [2].György Bognár, Z. Szűcs, V. Székely, M. Rencz, Contactless thermal characterization of high temperature test chamber, *Microsyst Technol*, 15: pp. 1279-1285., (2009)
- [3].Gy. Bognár, P. G. Szabó, G. Takács, Generalization of the thermal model of infrared radiation sensors, *Microelectronics Journal*, 46: pp. 543-550., (2015)
- [4].Dr. Bognár György, Dr. Szabó Péter Gábor, Távoli infravörös (FIR) érzékelők, Áramköri környezet kialakítása, BME-EET, (2015)
- [5].Dr. Bognár György, Dr. Szabó Péter Gábor, Takács Gábor, Sugárzásos hőátvitel és mikrocsatornás hűtőeszközök hőátadási folyamata, Áramköri környezet kialakítása, BME-EET, (2015)

- [6].Rotaru Benjamin Daniel, Flexibilis, hőmérséklet-eloszlás érzékelő kártya modellezése és karakterizálása, Önálló laboratóriumi beszámoló, BME-EET, (2019)
- [7].Nyilas Lehel, Flexibilis hőmérséklet-eloszlás érzékelő kártya fejlesztése és karakterizálása, Önálló laboratórium beszámoló, BME-EET, (2018)
- [8].Altium flexibilis NYHL hordozó tervezési segédlet (Altium Rigid-flex Guidebook), <http://www.altium.com/rs/altium/images/Altium-Rigid-Flex-Guidebook.pdf>
- [9].Minco Flexibilis áramkör tervezési útmutató (Minco Flex Circuits Design Guide), <http://www.minco.com/resourcecenter/productguides>
- [10]. Epec Kialakítási stratégiák rigid-flex NYHL tervezéshez (Epec COST SAVING STRATEGIES FOR RIGID-FLEX DESIGNS), <http://info.epectec.com/guides/rigid-flex-circuit-design-cost-saving-strategies>
- [11]. Flexible Circuit Technologies Flexibilis NYHL és hőszigetelő tervezési útmutató (Flexible Circuit Technologies Flexible Circuit DESIGN GUIDE), https://www.flexiblecircuit.com/wp-content/uploads/2015/08/FCT_Design_Guide1.pdf
- [12]. Dupont Kapton Polyimide Film General Specifications, Bulletin GS-96-7, <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-HN-datasheet.pdf>
- [13]. Auter Kft tervezési szabályai, <https://auter.hu/merev-flexibilis-aramkorok/>