

# Mikroelektronika - Termikus laboratórium


## VLSI áramkörök termikus viselkedése, hőtranszfer a tokon belül

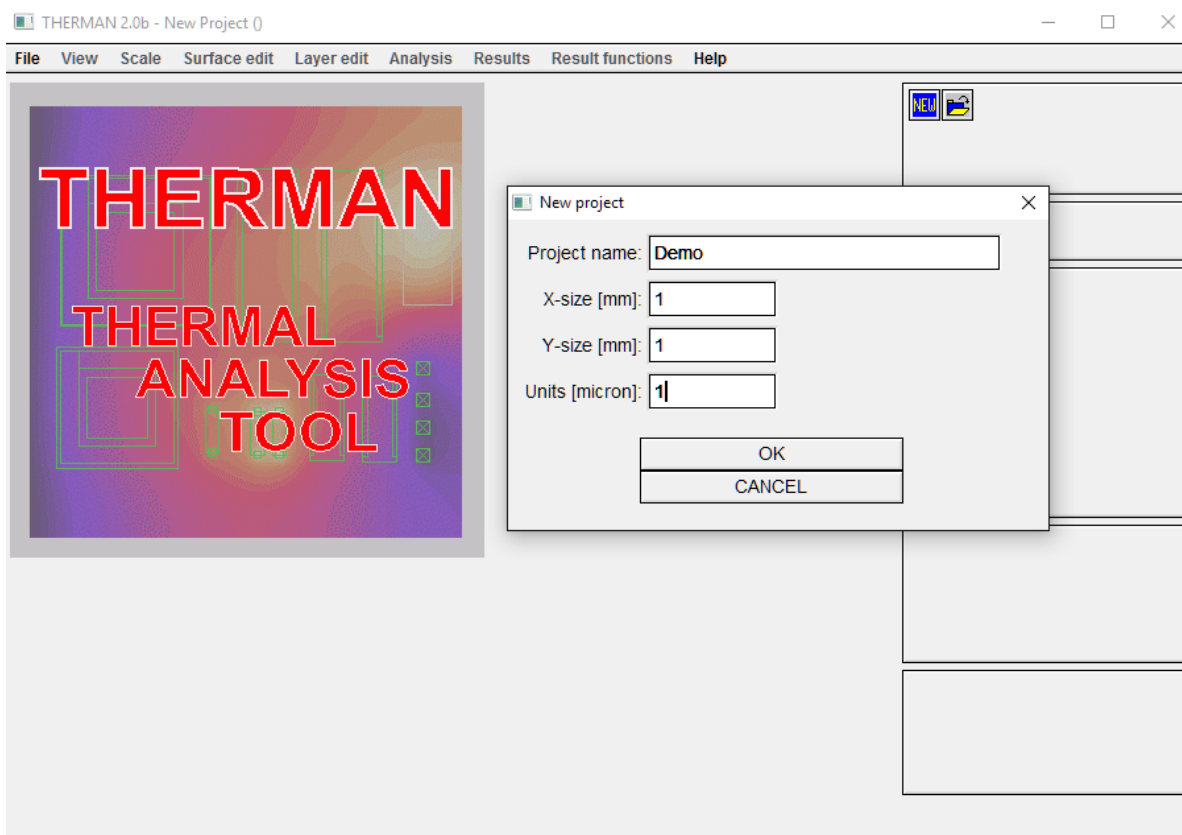
átdolgozta: Hantos Gusztáv (v5)

Az *Elektronikus Eszközök Tanszékén* fejlesztett Therman nevű programot fogjuk használni. Habár a program régebben készült mégis számunkra megfelelően, kellő egyszerűséggel, mégis szemléletesen mutatja be az integrált áramkörök, FR4 panelek és egyéb 2,5D-ben megalkotható struktúrákban lejátszódó melegedési folyamatokat.

A program indításához Windows operációs rendszer szükséges, egyéb platformokra nem került lefejlesztésre. Egy licencelt hivatalos terméke a Siemens-nek, nem az egyetem gondozásában áll, így nincs lehetőségünk ezt feloldani.


Elöljáróban: **3 „önálló” feladat van** ezen dokumentum végén, ezekre hivatkozunk mint „feladat” pl az egyéb oktatási felületeken, TOVÁBBÁ a következő sortól egy **Demo rész** következik, ami írásban „vezetett” tutorial, ez nem kerül számonkérésre!

A szimulátort a **therman.exe** –vel indítsuk el, nem a `therman_gui.exe` vagy egyéb hasonló nevűvel. Miután elindult a program hozzunk létre egy új projektet a  ikonra kattintva vagy a legördülő menüben **File>New project**-et kiválasztva. Első projektünknek legyen a neve Demo (**Project name:**) és adjunk meg **1-1 mm**-t a szimulálni kívánt struktúra vízszintes dimenzióinak, tehát állítsuk be, hogy a szimulálni kívánt három dimenziós térrészben az X és Y irányú kiterjedéseket (**X-size [mm]**, **Y-size [mm]**). Az utolsó sorban (**Units [micron]**) a felülnézet felbontását adhatjuk meg, másszóval, hogy a beállított 1 mm-en 1 pont, hány mikrométer oldalhosszúság lesz. Az egyszerűség kedvéért állítsunk be **1 µm**-t és kattintsunk az **OK** gombra (1. ábra).

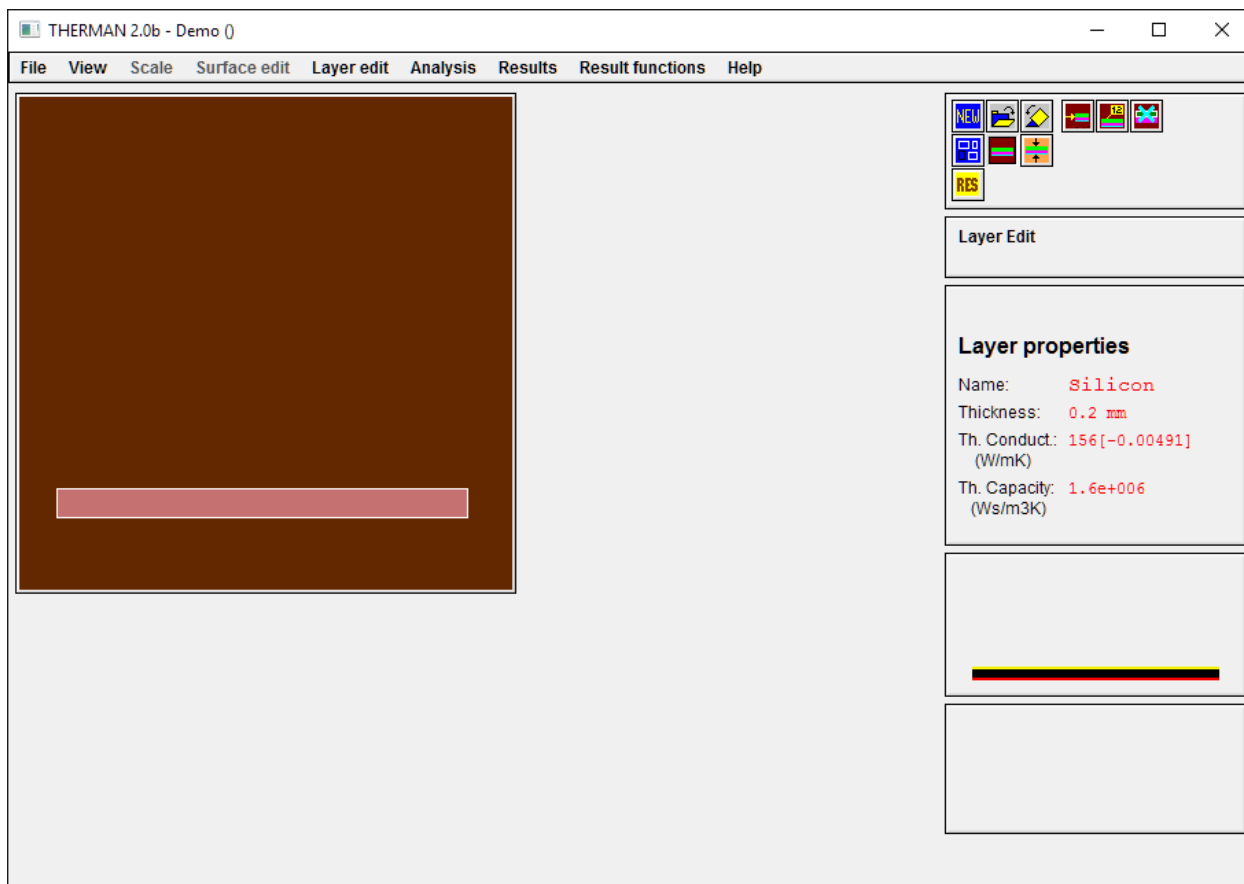


1. ábra New project

A következő lépésben a rétegszerkezetet adhatjuk meg a téglatest alakú térrészünkben.

A középső barna - jelenleg üres – részben vizualizálódik majd a függőleges felépítés a rétegek a hozzáadásával. Kattintsunk a  ikonra vagy a legördülő menüben a **Layer edit>Insert**-re. A felugró ablakban állíthatjuk be az egyes rétegek paramétereit. Habár lehetőségünk van bevinni egy tetszőleges elemet egyedi termikus vezetőképességgel és fajlagos hőkapacitással, használjuk a beépített elemkönyvtárból betölthető anyagokat, amelyet a **SELECT** gomb megnyomásával hozhatunk elő. A felugró ablakban válasszuk ki a szilíciumot (**Silicon**). Láthatjuk, hogy a könyvtár ablakának eltűnését követően az Insert layer ablakban megjelentek a szilíciumhoz tartozó paraméterek. Vastagságnak (**Thickness**) állítsunk be **0.2 mm**-t, ami egy tipikus szilícium szelet vastagságának felel meg, majd kattintsunk az **OK** gombra. Olykor át kell nevezni a betöltött anyagok nevét, több azonos anyag esetén pl: Copper1 majd Copper2, vagy EPOXY-fiberglass (FR4) esetén ki kell törölni a speciális karaktert, vagy át kell írni a hővezetési együtthatót, ha erre pl majd a 3. feladat utal (25% hővezetésre, 402 -> 100 W/mK).

Láthatjuk, hogy megjelent egy keresztmetszeti réteg ábrázolás a központi ablakban. Ha fölé visszük a kurzort, akkor jobb oldalt a **Layer properties** alatt megjelennek réteg adatai (2. ábra). Ellenőrizzük vissza az értékeket amit megadtunk!



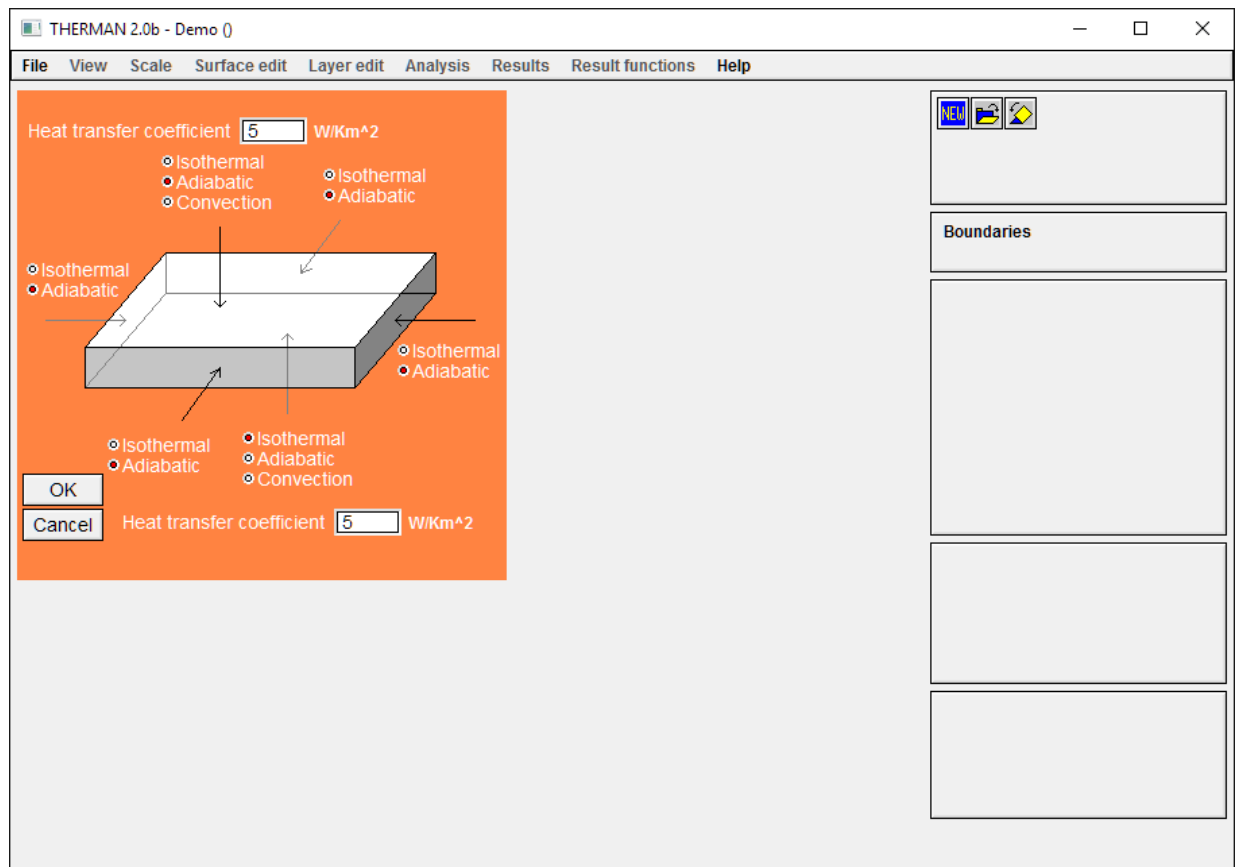
2. ábra Rétegszerkezet kialakítása

A rétegek definiálása után továbbmehetünk a peremfeltételek definiálására (**View>Boundaries**) vagy a felülnézetbe (**View>Surface**), ahol a disszipáló felületeket adhatjuk meg. Először állítsuk be a peremfeltételeket. A középső részben megjelent narancssárga felületen belül láthatjuk, hogy a három dimenziós térrészünk egy-egy oldalára milyen termikus határfeltételeket adhatunk meg. Fontos látnunk, hogy ez szimulációs szempontból mit is jelent. A szimulálandó TELJES struktúránk környezettel való kapcsolatát ezeken a határfeltételeken keresztül kell megadnunk. Nem layer szintű a boundaries, egyetlen globális beállítás ez a struktúrára, függetlenül a később létrehozandó rajzolatoktól. A szimuláció során egy véges térfogatú elemet vizsgálunk. Ezen a térrészen kívül azonban a világot állandónak kell feltételeznünk (speciális eset a változó peremfeltétel, amikor nem állandó a környezet, de ez nem ennek az a rövid leírásnak a témája). Hőtani vizsgálatok során mondhatjuk azt például, hogy állandó hőmérsékletű vagy fix sebességgel áramló levegő veszi körül a struktúrát. Attól függően pedig, hogy úgymond milyen "effektíven" képes a rendszer átadni a hőt a környezetének három különféle esetet különböztetünk meg a Therman programban:

- Adiabaticus (Adiabatic): az adott felületen nincs hőcsere a környezettel
- Konvektív (Convection): kizárólag az alsó vagy felső oldalon beállítható és az adott hőátadási tényezőnek megfelelő mértékű hőátadás lehetséges

- Izotermikus (Isothermal): tökéletes termikus kapcsolat van, az adott oldalt a hőmérséklet a környezet hőmérsékletével egyenlő.






















Állítsunk be izotermikus (**Isothermal**) peremfeltételt az alsó oldalra míg adiabatikusat (**Adiabatic**) a másik öt oldalra a *rádiógombok* segítségével és kattintsunk az **OK** gombra (3. ábra). Ebben a részben a rádiógomb szokott leginkább problémát okozni. Az elnevezés eredete: egyiket benyomva a másik kiugrik, régi rádiókészülékeken így, mechanikusan oldották meg az FM/AM sáv váltást -> mindig csak 1 legyen benyomva, de 1 biztosan. Néha megmakacsolják magukat a rádiógombok, ilyenkor tessék átírni a "heat transfer coefficient"-t illetve átváltatni a rádiógombokat és vissza, ettől helyre jön.




3. ábra Peremfeltételek beállítása

Ezt követően a program átvált felülnézetbe és elkezdhetjük a disszipáló elemek elhelyezését. Mindezek előtt ismét vegyük szemügyre az ablak felépítését. Jobb oldalt, felül láthatóak az egyes ikonok, melyek pár szavas leírását a 4. ábra mutatja. Alattuk látható, hogy épp melyik rétegen helyezük el a disszipáló elemeket. **MOST** ellenőrizzük, hogy ezen a jobb oldali keresztmetszeti rajzon a felső (kb néhány pixel vastag) rétege "citromsárga" a legfelső layer-nek amire rajzolni szeretnénk!!! Több layer-nél lesz ez különösen fontos, nem rajzolunk közbenső layer-re ha csak nem ezt mondja kifejezetten egy feladat. (ilyen egyelőre nincs).

Ezalatt az egér aktuális koordinátáit láthatjuk, ha éppen a kék színű felület felett jár. Később a disszipáló elem elhelyezésekor látni fogjuk, hogy további információk is megjelennek majd a geometriával kapcsolatban. A negyedik részben, jobb alul a különféle rétegek (citromsárga színnel tehát az aktuális réteg, piros színnel pedig az inaktív rétegek)) között válthatunk. Annak ellenére jelenleg csak egy szilícium rétegünk van, látható egy másik piros csík is, ami egy úgynevezett BASE réteg, amit például rajzolás segítésére lehet felhasználni bonyolultabb alakzatok bevitelekor. Fontos megjegyezni, hogy a BASE egy virtuális réteg, a rajta elhelyezett disszipáló elemek semmilyen hatással nem lesznek a szimulációra. Tipikus hiba, amikor  $T_{ambient}$  (25°C) eredményt ad vissza a szimuláció, hogy rossz oldalra rajzoltunk. Ilyenkor cut/paste a megfelelő layer kiválasztása mellett orvosolható könnyen a hiba.

 New project	 Open project	 Close project	 Draw rectangle	 Draw polygon		 Add CM	 Fit size
 View surface	 View layer structure	 View boundaries	 Move	 Delete	 Add probe	 Rotate CM left 90°	 Shape search
 View results			 Cut	 Copy	 Paste	 Rotate CM right 90°	 Change attributes


4. ábra Felületi nézetben megjelenő ikonok magyarázata

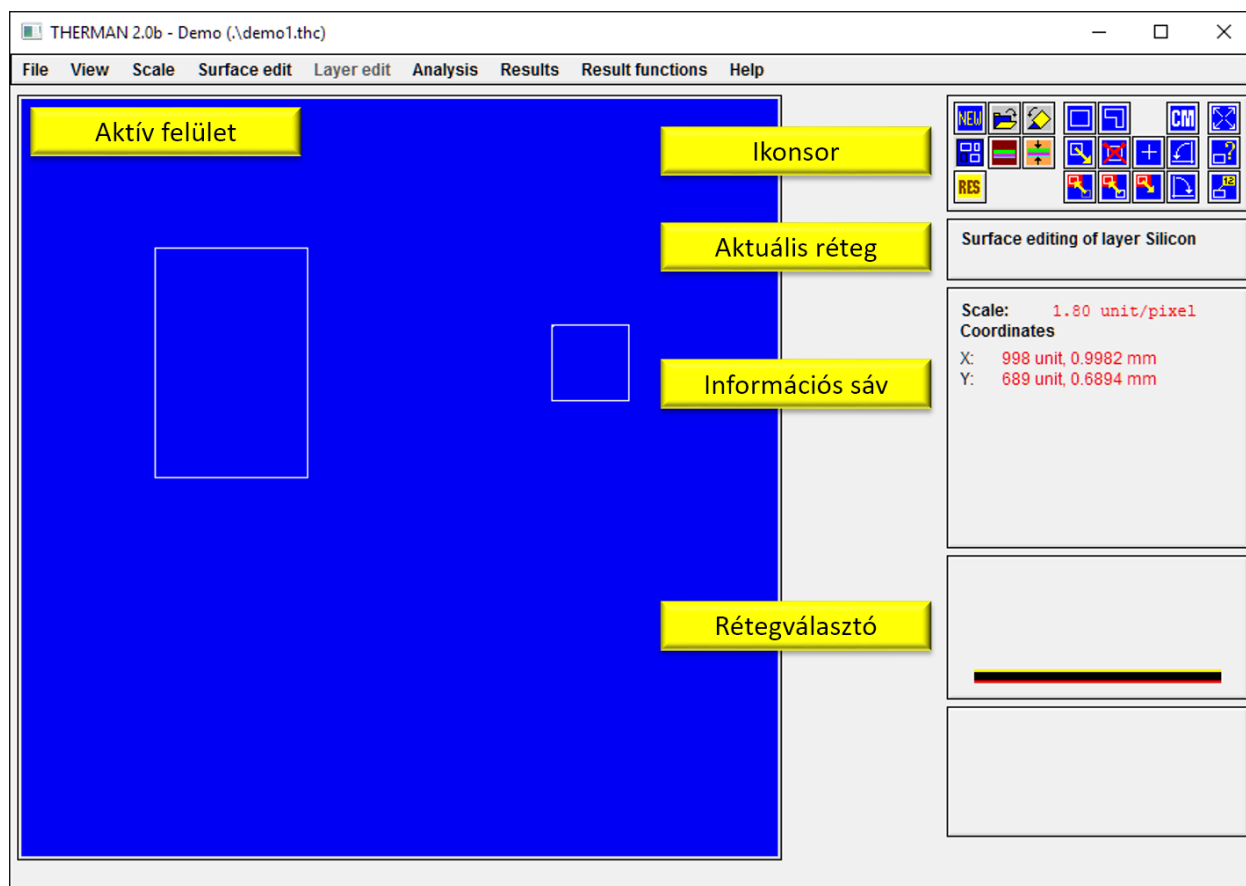
Kattintsunk a  ikonra vagy a **Surface edit** legördülő menüben az **Add>Rectangle**-re, de jobb oldalt az ikonok köz is találunk rá gyors elérést.

Ezt úgy érdemes csinálni, hogy húzunk kézzel egy tetszőleges négyszöget, mindegy mekkorát és hova, középre, féljén el, nem túl nagyot, majd a felugró ablakban írjuk be a megadott számokat. MOST vegyük észre az attribútumos ablak alján, hogy **van X/Y position és X/Y size**. Rendre a position-t szokták a hallgatók átírni miközben a méretet adják meg, és hibát is jelez a program, mert rajzterületen kívülre kerülhet a poligon. **X/Y size mezőket írjuk át**, valamint ha van előjel, azt hagyjuk meg (ez a pl balról jobbra lefele húzással függ össze -> negatív. Y érték).

Nagyjából az **X: 180 unit** és **Y: 800 unit** fölé hozzunk létre egy kb. **200 x -300 unit**-os téglalapot. Ha elengedjük a bal klikk-et rajzolás után egyből megjelenik az „attribútumos ablak” az adott alakzathoz. A disszipáló elemünknek adjuk azt a nevet (**Label:**), hogy **Tranz1** és disszipáljon **fél Watt**-ot (Dissipation power [W]:). **FONTOS, hogy tizedes ponttal** írjuk be az értékeket itt. Látható, hogy még számos egyéb paramétert is megadhatnánk, számunkra állandósult állapotbeli szimulációkhoz azonban kizárólag a pozíció (**X position [unit], Y position [unit]**) és a méret (**X size [unit], Y size [unit]**) érdekes. Ha kész, kattintsunk az **OK** gombra. Helyezzünk el még egy **(100)x(-100) unit**-os elemet (**Tranz2**, disszipáció: **0.1 W**) **X: 700 unit; Y: 700 unit** pontra.

2+ alakzat felett derül ki, ha rossz file-t indítottunk el mégis, jelez a szoftver, hogy nem tud kezelni ennyi mindent licence hiányában, általában a 2. feladatnál jön ez elő.

Arra az esetre, ha elrontanánk vagy ellenőriznénk az alakzat méretét/disszipálását, kattintsunk először az adott objektumra majd a  ikonra és ismét felugrik a hozzá tartozó Change rectangle attributes ablak. (5. ábra).



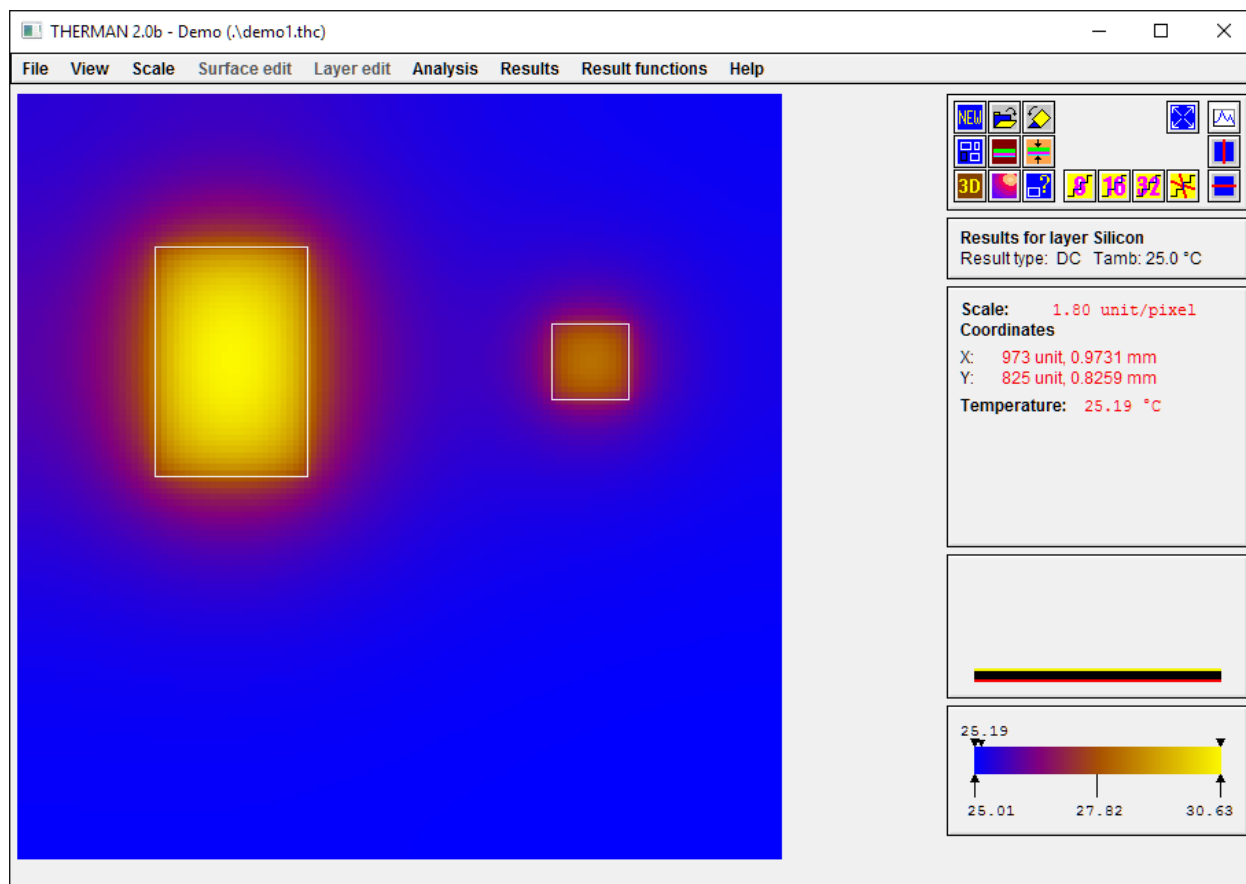
5. ábra Elhelyezett disszipáló elemek és a kezelőfelülethez tartozó rövid magyarázat

Most mentünk, szimuláció előtt MINDIG tessék elmenteni. Felugrik 1x automatán, de ha nem zárjuk be a későbbi feladatok között a programot (ami egyébként erősen javasolt hogy bezárjuk), nem ugrik fel a save automatán a szimuláció előtt, és furcsa hibákat fogunk kapni!





Futtassunk le egy állandósult állapotbeli szimulációt! Kattintsunk az **Analysis** legördülő menüre, aminek hatására felugrik a Save project ablak abban az esetben ha még korábban nem mentettük le a munkánkat (**File>Save project as**). Fontos, hogy az alpból felajánlott könyvtárba mentjük el a munkánkat Demo1 – **mindegy milyen néven, de ékezet/spec karakter nélkül!**

Ha rákattintunk az **OK** gombra, akkor felugrik az Analysis conditions ablak. Állítsunk be **DC** szimulációt és **25 °C** környezeti hőmérsékletet (Ambient temperature). A többi beállítási lehetőséggel most ne foglalkozunk, hagyjuk őket változatlanul és kattintsunk az **OK** gombra. Rövid időre megjelenik a THERMAN Solver nevű ablak, ami gyorsan el is tűnik mivel csak egy időpillanatban (végállapotban) kell kiszámolnia a programnak a hőmérséklet értékeket.

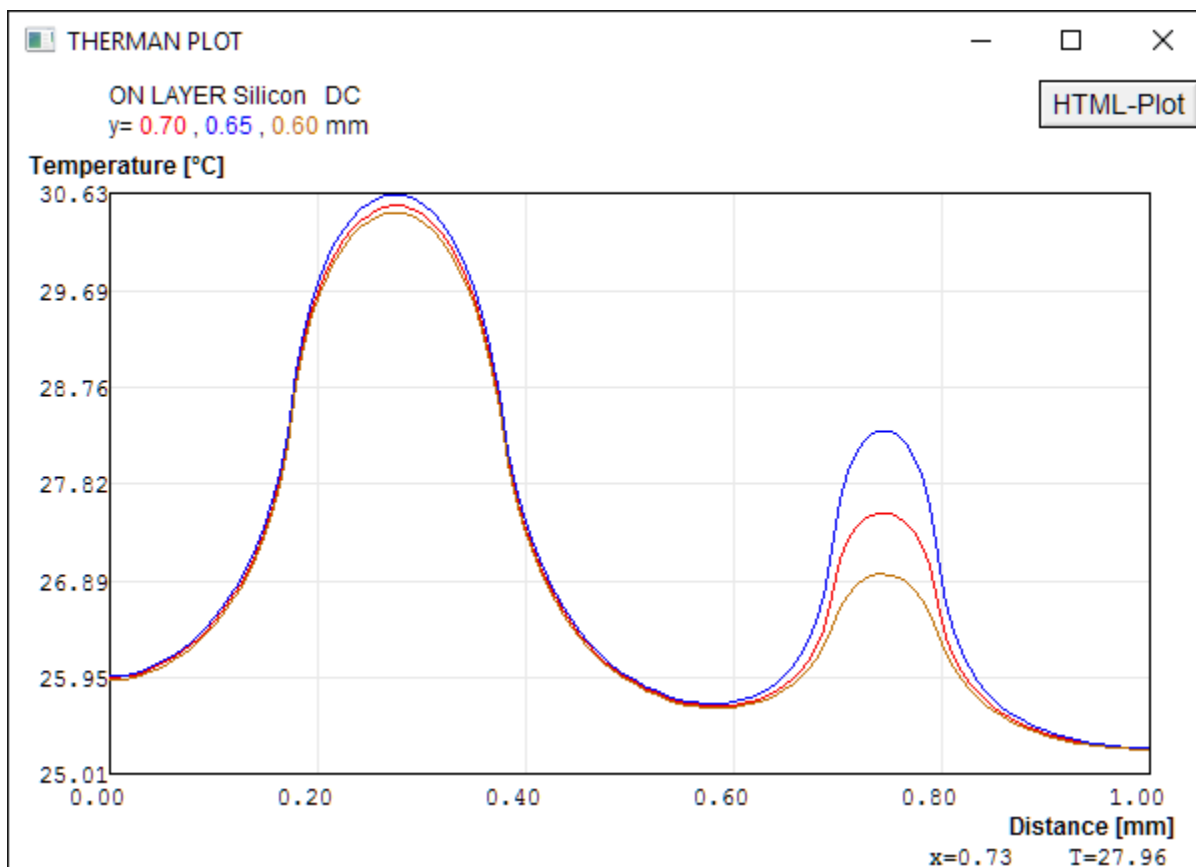
Kattintsunk a **RES** ikonra vagy a **Results** legördülő menüben a **Pictures**-re. A Valid solutions ablakban nem kell semmit sem megváltoztatni (mivel csak **DC** szimulációs eredményeink vannak), csak kattintsunk az **OK** gombra. Ekkor megkapjuk a 6. ábra által bemutatott hőterképet. Az egér mozgatásával jobb oldalt alul megmutatja a program, hogy az aktuális pontban mekkora a hőmérséklet és, hogy ez a skálán hol helyezkedik el a maximális és minimális értékek között. Ha a kurzorral az egyik objektum fölé megyünk, akkor zölddel kiírja az átlaghőmérsékletét.



6. ábra Felületi hőmérsékleteloszlás

A  és  ikonok segítségével felvehetünk vonalmenti hőmérsékleteloszlás grafikonokat is. Kattintsunk a  ikonra és ezt követően a Tranz2 objektum felső szélére, közepére és aljára. Látható, hogy megjelent három darab vízszintes vonalunk. Ha ezt követően a  ikonra kattintunk, akkor megjelenik a THERMAN PLOT ablak, ahol a különféle vonalmenti hőeloszlásokat láthatjuk (7. ábra). Amennyiben szükségesnek látjuk, további vonalmenti hőmérsékleteloszlásokat vehetünk fel vagy ki is törölhetjük az aktuális eloszlásainkat ha jobb egérgombbal kattintunk az egyes vonalakra.

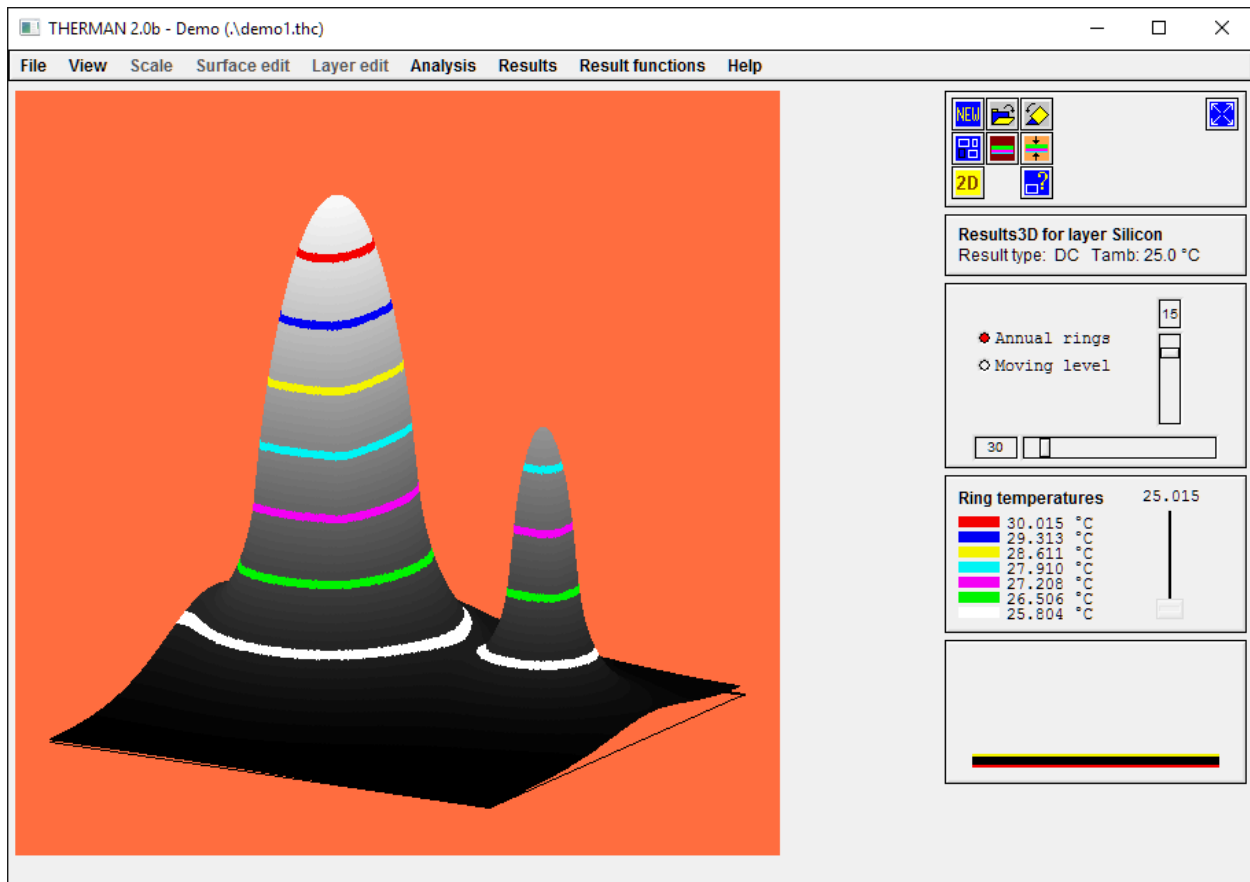
**Akinek Nap felszíni hőmérsékletek jönnek ki a szimulációból, az nézze át a definiált poligonokat, vélhetően 1.0 Watt helyett 10 lett vagy épp vesszővel írta be, boundariest elkattintott, ellenőrizzük ezt a néhány egyszerű beállítást.**



7. ábra Vonalmenti hőmérsékleteloszlás

Érdekességgént megnézhetjük még a **3D** ikon segítségével az adott rétegen kialakult hőmérsékleteloszlást három dimenziós koordinátarendszerben is (8. ábra). A függvényt a jobb rálátás érdekében a jobb oldali kezelőfelületen található csúszkákkal tudjuk elforgatni.



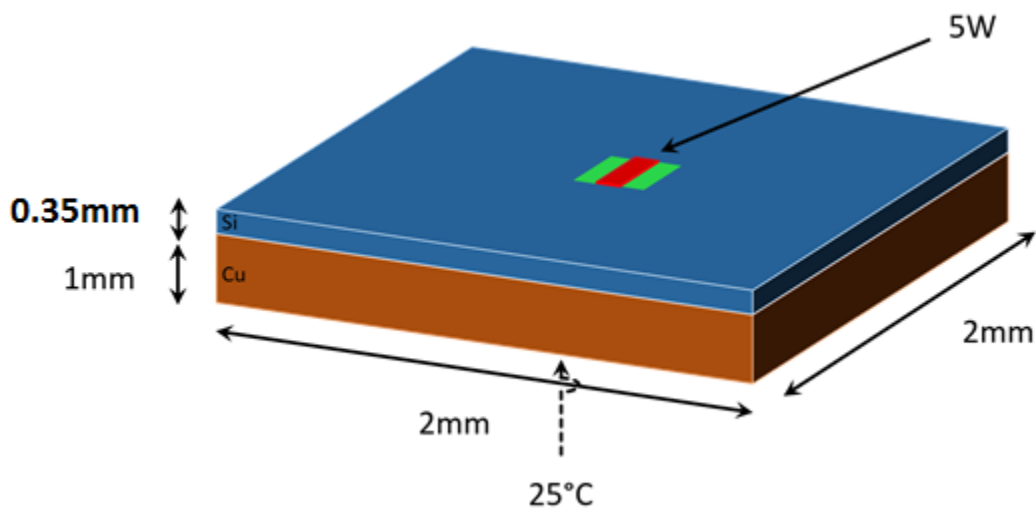


8. ábra 3D függvényel leírt felületi hőmérsékleteloszlás

### Számokért 3 feladat:

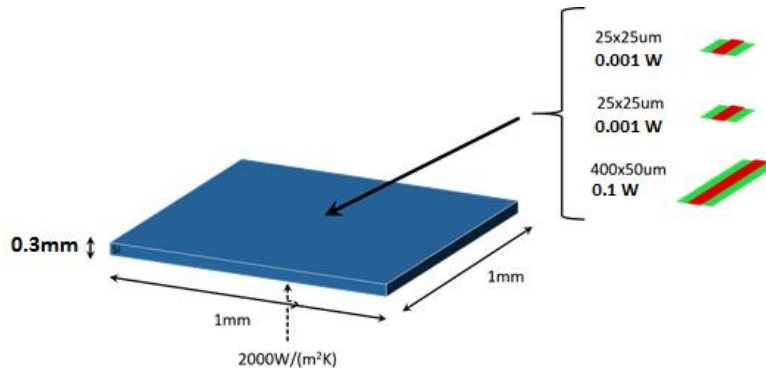
1. Egy integrált áramkör 2x2x0.35mm-es Si lapkája 1mm vastag Cu lemezre van forrasztva, utóbbi alja konstans 25 °C-on van, egyéb irányból nincs hő közlés. A lapkán egy 200x200um nagyságú 5W-ot disszipáló téglalapot (képzeletbeli tranzisztort) kell elhelyeznünk. Három esetet vizsgáljunk meg:
  - a) a lapka közepe (109°C a helyes csúcsérték)
  - b) egyik oldalél közepe
  - c) egyik sarok.

**Tanulság:** hasonlítsuk össze az eredményeket, vegyük észre, hogy a fő disszipáló elemet középre érdemes elhelyezni. A „második legjobb pozíció” egy oldalfelező pont, majd a legrosszabb a sarok. Ennek aktív emlékével oldjuk meg a 2-es feladatot, ahol már 3 alkatrész lesz!



9. ábra Első feladat

2. Egy műveleti erősítő IC lapka méretei  $1 \times 1 \times 0.3$  mm, a tok hűtőhatását az alsó felületen  $h=2000 \text{ W/m}^2\text{K}$  (konvektív) hőátadási tényezővel vesszük számításba. Egyéb irányból hő közlés nincs. A kimeneti fokozat tranzisztora ( $P=0.1 \text{ W}$ )  $400 \times 50 \text{ }\mu\text{m}$  méretű, a bemeneti differenciálerősítő tranzisztorai  $25 \times 25 \text{ }\mu\text{m}$  méretűek ( $P=0.001 \text{ W}$ ). Helyezzük el úgy a 3 tranzisztort, a következők mind egyszerre teljesüljenek, tehát 1 jó megoldást kérünk!



10. ábra Második feladat

Teljesüljön, hogy

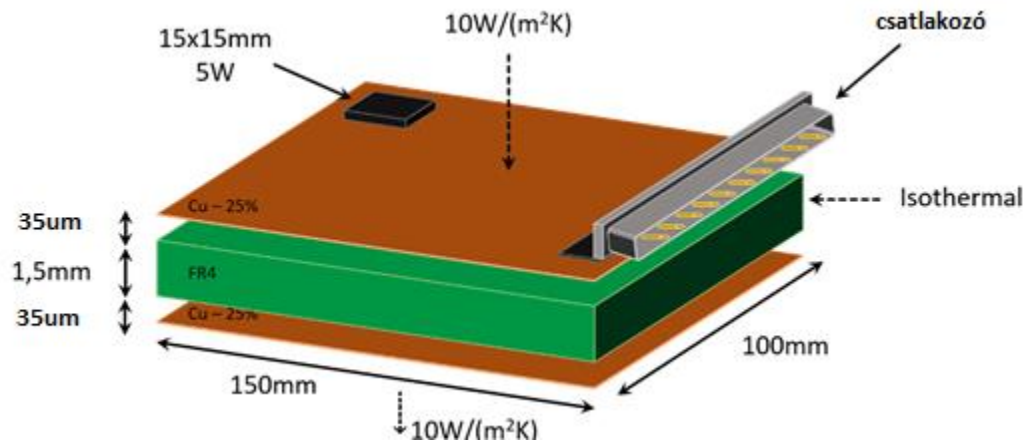
- a kimeneti tranzisztor disszipációja a lehető legalacsonyabb csúcs hőmérsékletet eredményezze lapka szinten, a termikus zaj csökkentésére,
- ne okozzon hőmérséklet különbséget a bemeneti differenciál-erősítő tranzisztorai között, offset feszültségek csökkentésére,
- azonos gyártástechnológiai hatások érvé a diffpár tagjait – alámaródás, levilágítás, technológiai szórások, idegen alakzat közelsége stb.!

**Tanulság:**  $75\text{--}80^\circ\text{C}$  között lesz a teljes lapka hőmérséklete helyes megoldás esetén (és olykor rossznál is), de nem a konkrét érték az üzenet itt, hanem a helyes elhelyezés! Ehhez az alábbi vezérelveket jegyezzük meg:

- fő disszipáló elem a „hűtött részre nézve” középre kerüljön (kimeneti tranzisztorra)
- szimmetrikus elhelyezés, így azonos izotermára is kerül amit egyforma működésűnek, azonos munkapontba szánunk
- szorosan egymás mellé tegyük azt – a valóságban azonos állással is –, amit technológiailag is egyformára gyártva szánunk (diffpárt itt), és a „második legjobb pozícióba”, észben tartva az első feladat tanulságát!

3. Egy 100x150 mm méretű, 1.5 mm vastagságú FR4 (Epoxy-fiberglass) nyomtatott panelt vizsgálunk, 1000 $\mu$ m legyen ezúttal a UNIT, így „mm”-ben dolgozhatunk. A kétoldali, 35  $\mu$ m vastagságú Cu fémezést a kialakított vezetékezés részleges jellege miatt a könyvtári hővezetés 25 %-ával vegyük csak figyelembe. A panel rövidebbik élén a csatlakozót ideális izotermikus határfeltétellel reprezentáljuk. A panel alsó és felső oldalán  $h=10$  W/m<sup>2</sup>K (konvektív) hőátadási együtthatót alkalmazzunk. Helyezzünk el egy 5 W disszipációjú, 15x15 mm méretű téglalapot (ami most egy konkrét tokozott IC-t reprezentál) a panelon és vizsgáljuk meg az alábbi eseteket:

- a) csatlakozótól távoli sarokban
- b) panel közepén
- c) csatlakozó menti oldalfelező pontban (135°C a helyes csúcsérték).



11. ábra Harmadik feladat

**Tanulság:** az előző két feladat megtanított minket *mindenre is*, ez pedig rámutat, hogy miért **NE** rutinból cselekedjünk. Vegyük észre, hogy amíg a csatlakozónál elhelyezett alkatrész „tud érdemben hűlni”, addig a panel közepén olyan meleg lesz már, hogy a működés határára kerül, a legrosszabb esetben – a csatlakozótól távoli sarokban – pedig már-már kiforrasztja magát a panelről. Itt nyernek értelmet a 2-es feladat azon szavai, miszerint a „hűtött részre nézve” középre kerüljön a fő disszipáló elem, mert itt ez NEM a PCB geometriai közepén, hanem a csatlakozó menti oldal felezőpontja lesz ez, mivel az az „érdemi hűtés” jelenleg.

Ez egy valóságghű eset, rack szekrényekben találkozunk ilyen csatlakozókkal, kártyákkal és olykor sajnos rossz termikus megoldásokkal is.

- VÉGE -