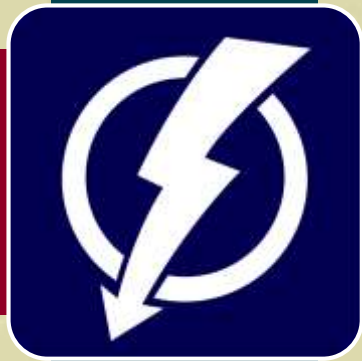




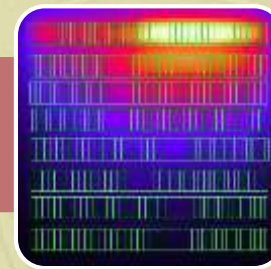
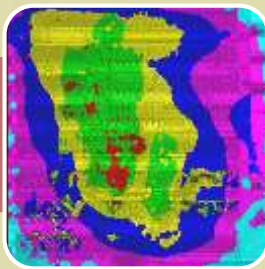
Budapest Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem



Integrált termikus menedzsment System-on-Chip rendszerekben

Dr. Bognár György

Elektronikus Eszközök Tanszéke



Bevezetés

► OTKA 109232 Alapkutatói projekt

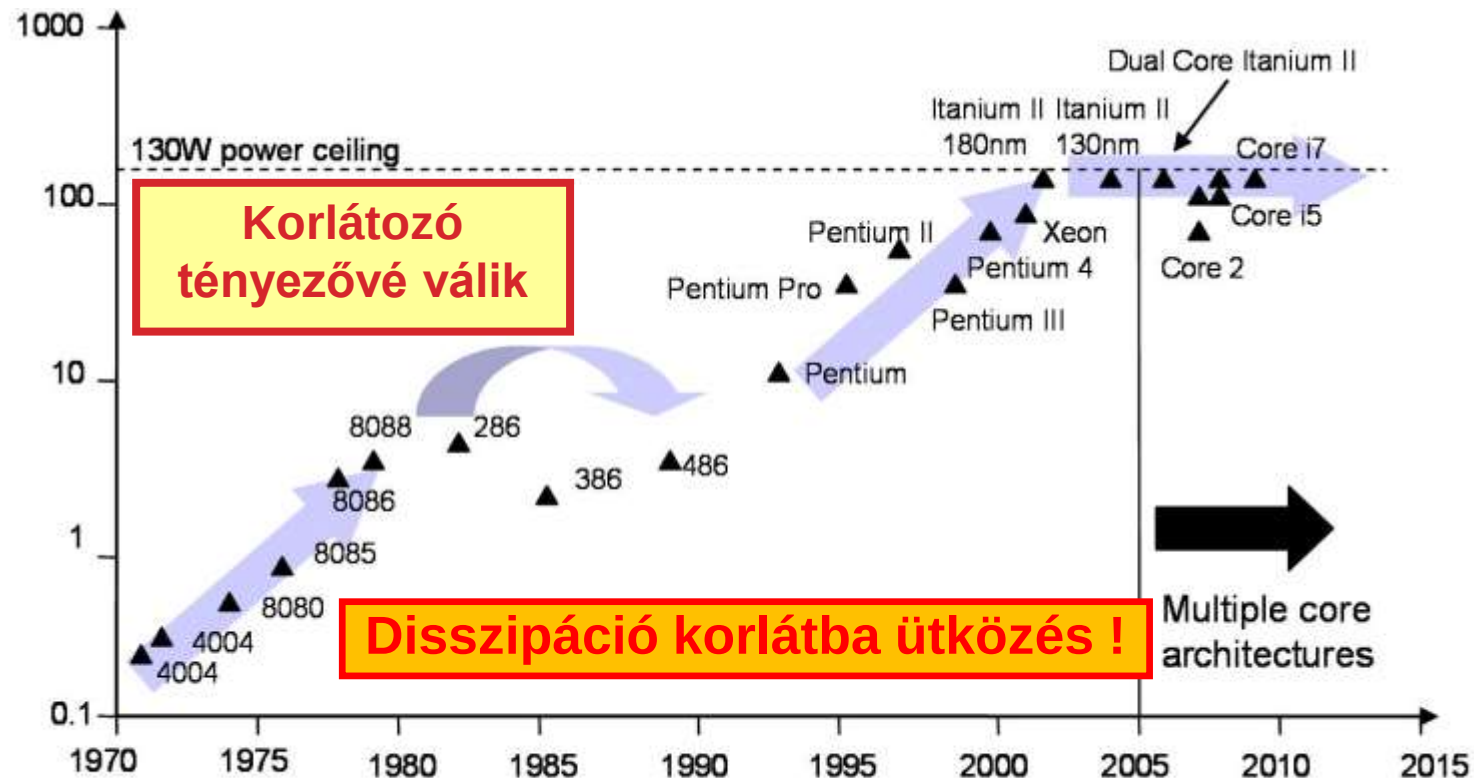
- Futamidő: 2014 január – 2018 június
- Kutatás fő célja ún. integrált termikus menedzsment megoldások kidolgozása System-on-Package 3D integrált eszközök számára:
 - a hűtés hatásfokának növelése,
 - az $R_{th_{jc}}$ és/vagy $R_{th_{ja}}$ csökkentése és
 - termosztálási lehetőség kidolgozása (Lab-on-Chip).
- A kutatás során elért eredmények:
 - **Mikroelektronikai technológiai eljárás kidolgozása szilícium chipek hátoldalán csatornák kialakítására** anizotróp/izotróp nedveskémiai marási eljárással, kompatibilitás előoldali aktív eszközökkel.
 - **Csatornák falai mentén megvalósuló hőtranszfer kompakt termikus modellezése.**
 - Csatornák felé áramlási rátától függő $R_{th_{MC}}$ **parciális hőellenállás meghatározása analitikus és validatív karakterizációs eljárás** kidolgozása.
 - **Thermal aware tervezési metodológia kidolgozása**, logi-termikus szimulációkkal való integrálás lehetőségei.

MOTIVÁCIÓ, BEVEZETÉS



Növekvő fogyasztás (disszipáció)

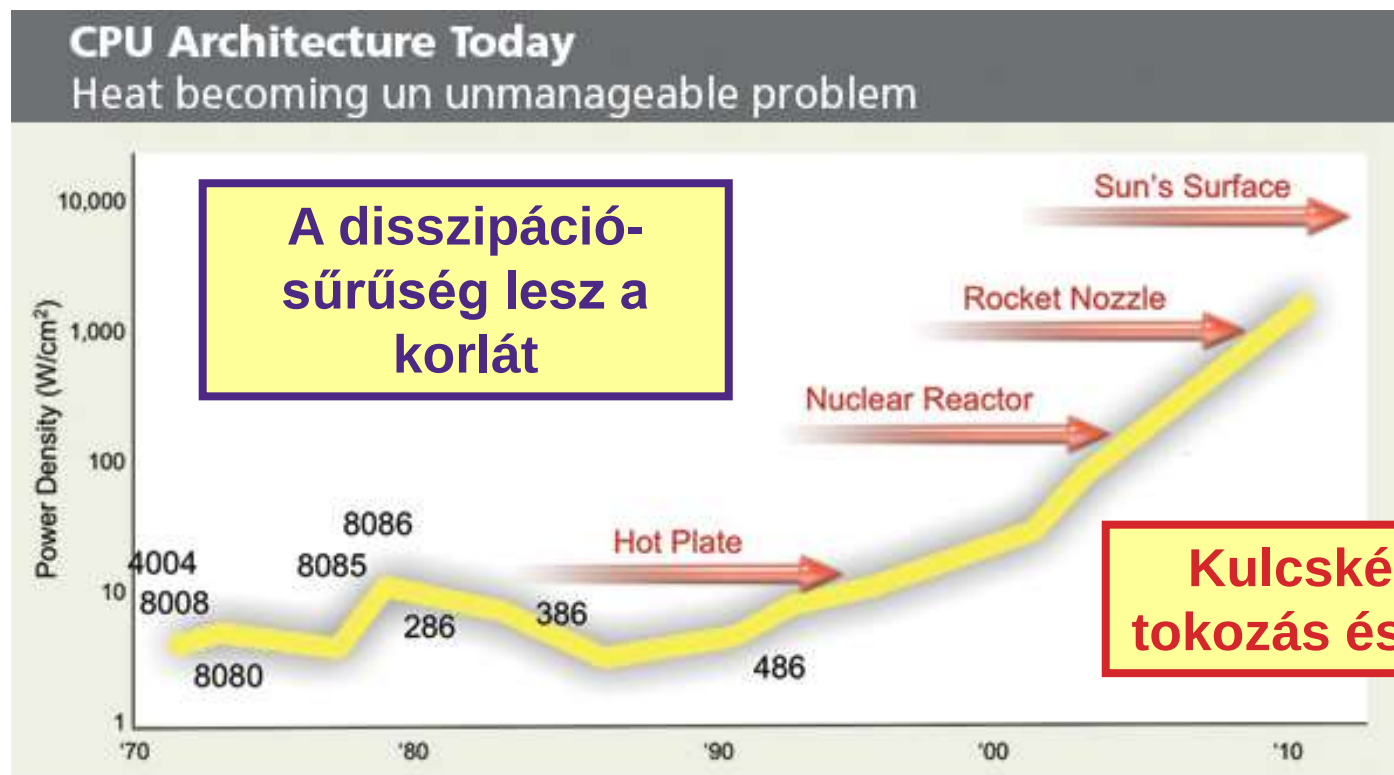
- Az órajel folyamatos növekedése volt megfigyelhető a vezető processzorok esetében (Intel, AMD, IBM, SUN, stb.)



Adapted from ARC 2010 presentation by Dr. Ram Krishnamurthy, Intel Research

Növekvő disszipációsűrűség

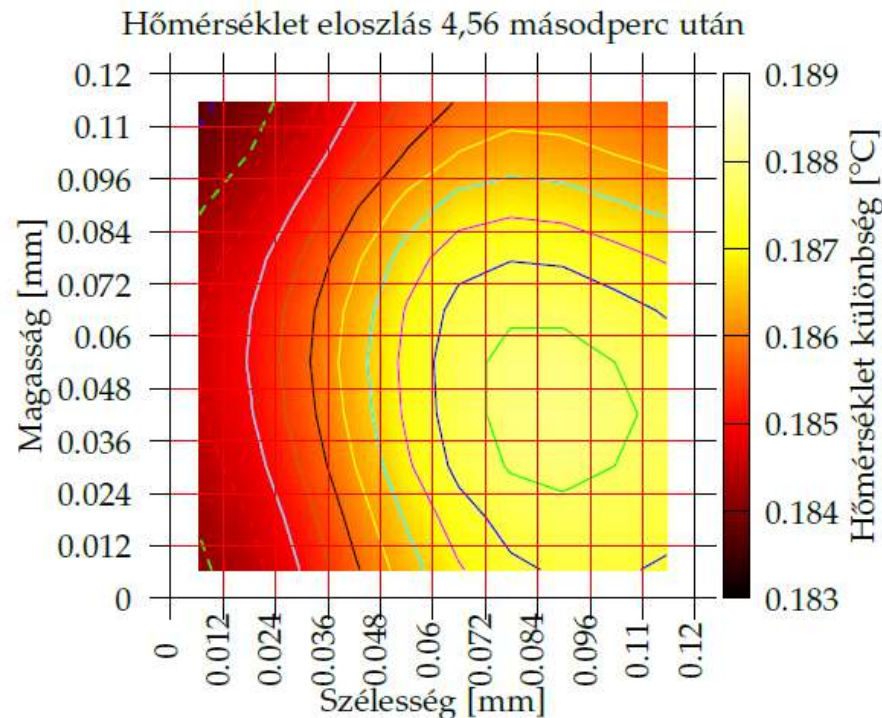
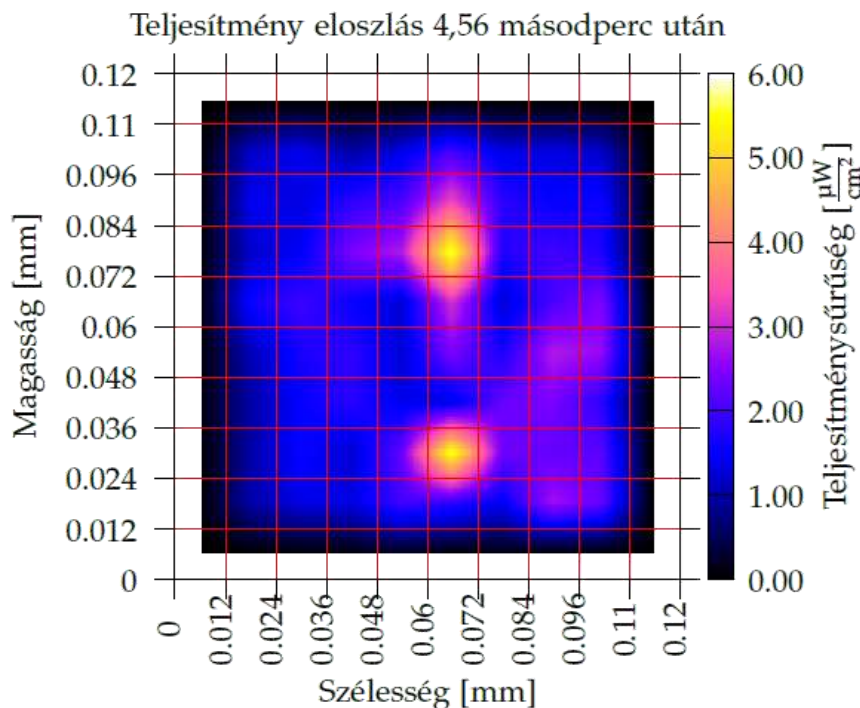
- Fogyasztás erőteljesebben nő, mint a lapkaméret, ezért a teljesítménysűrűség meredeken nő.



In CPU architecture today, heat is becoming an unmanageable problem.
(Courtesy of Pat Gelsinger, Intel Developer Forum, Spring 2004)

Növekvő disszipációsűrűség

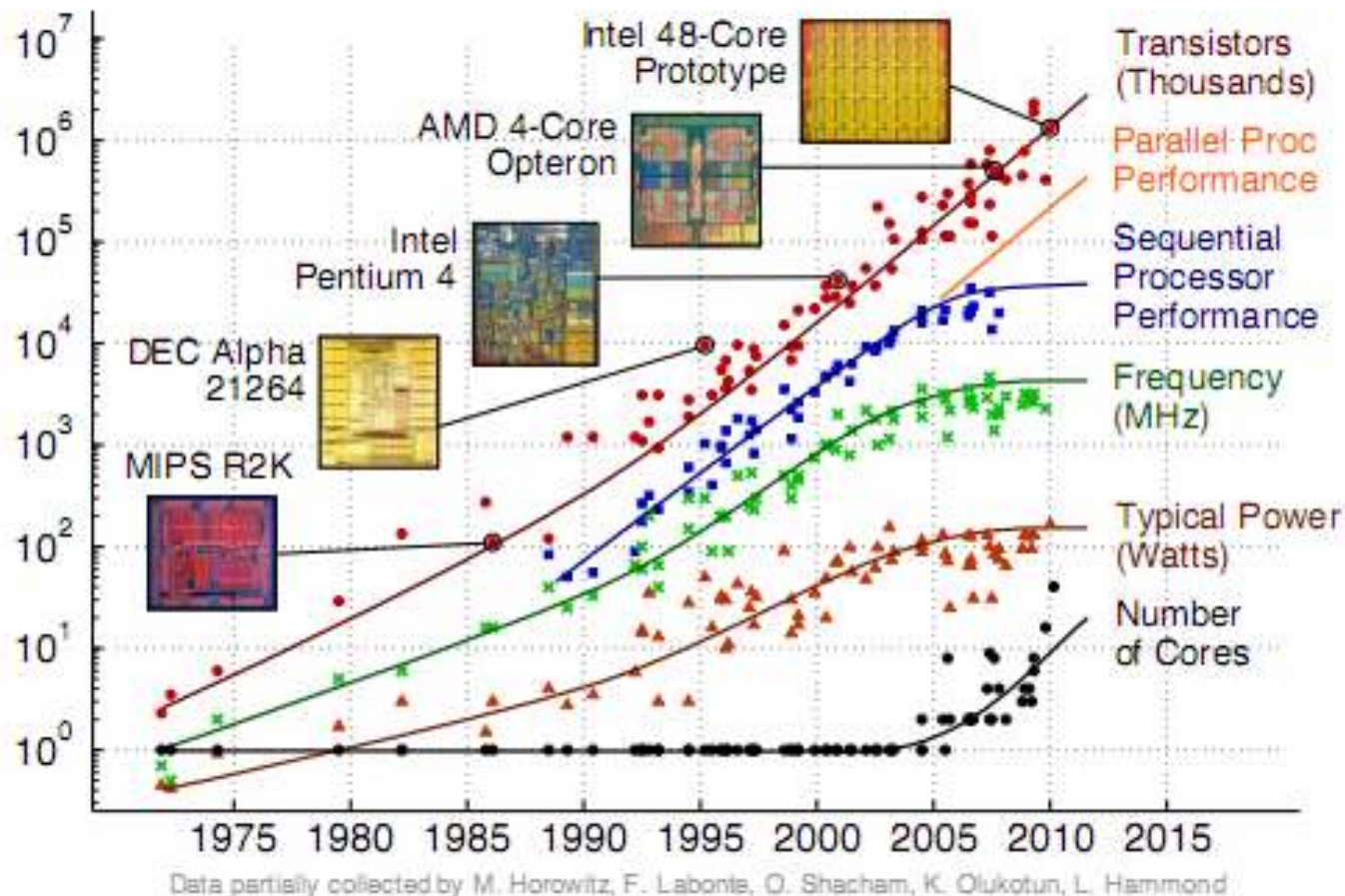
- IC-k felületén nem egyenletes disszipáció, nem egyenletes hőmérséklet eloszlás!



Logitermikus szimuláció eredménye – EET tanszéki K+F munka

Növekvő disszipációsűrűség

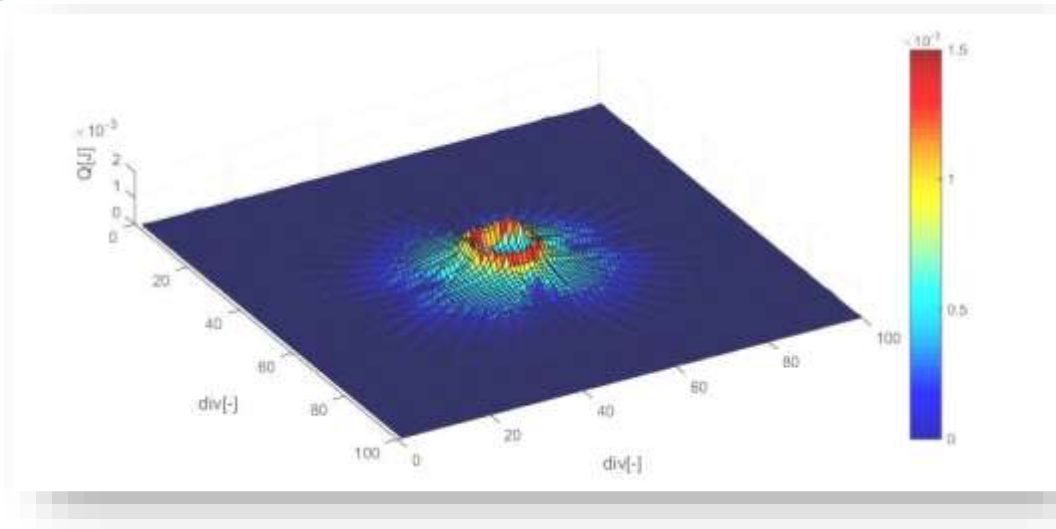
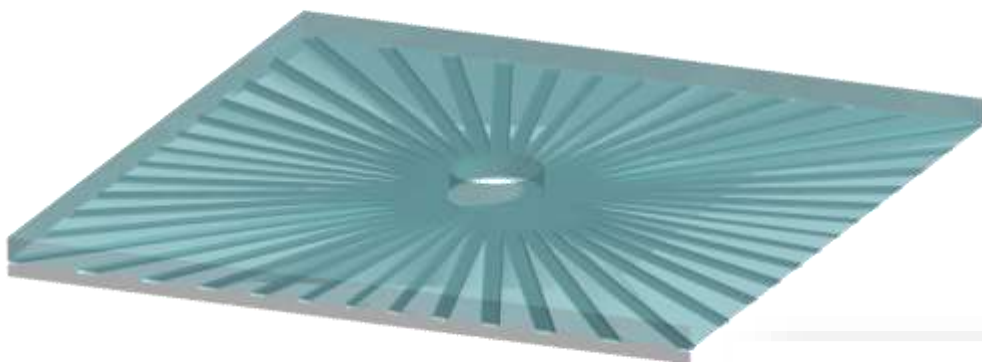
► Az órajel frekvencia növekedése megtorpant



Prepared by C. Batten - School of Electrical and Computer Engineering - Cornell

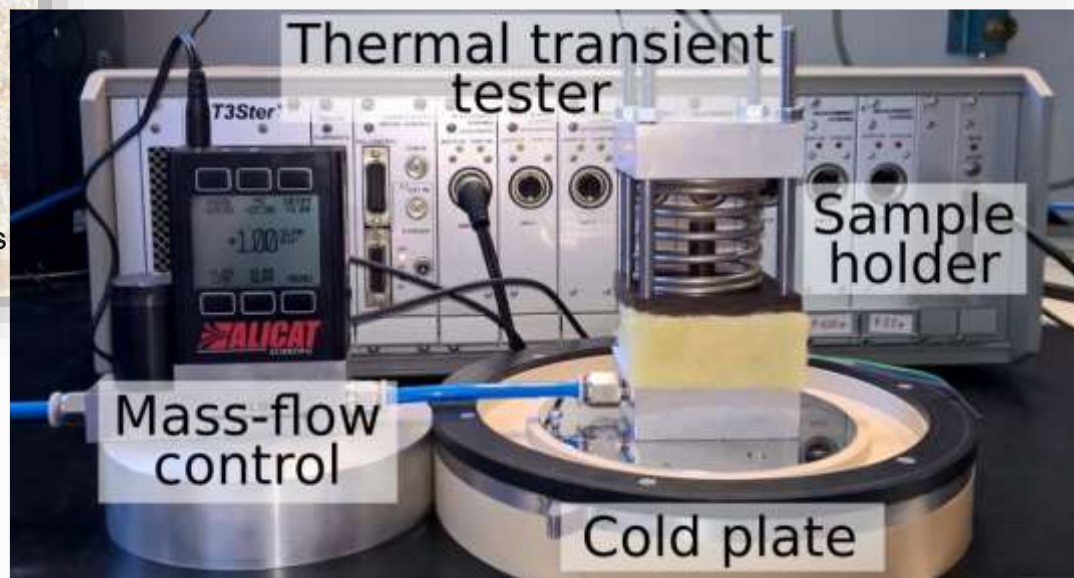
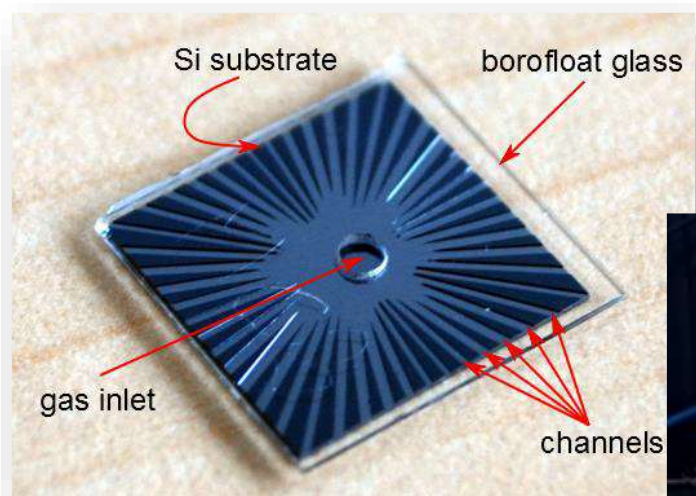
Megoldási lehetőség

- Egy megoldási lehetőség az integrált mikrocsatornás hűtőeszközök a chip hátoldalában vagy a köztes hordozóban kialakítva
 - 2006-tól aktuális, zajló kutatási téma az EET-n



Megoldási lehetőség

- Egy megoldási lehetőség az integrált mikrocsatornás hűtőeszközök a chip hátoldalában vagy a köztes hordozóban kialakítva



RÉGEBBI EREDMÉNYEK A KUTATÓMUNKA ALAPJAI



Motiváció

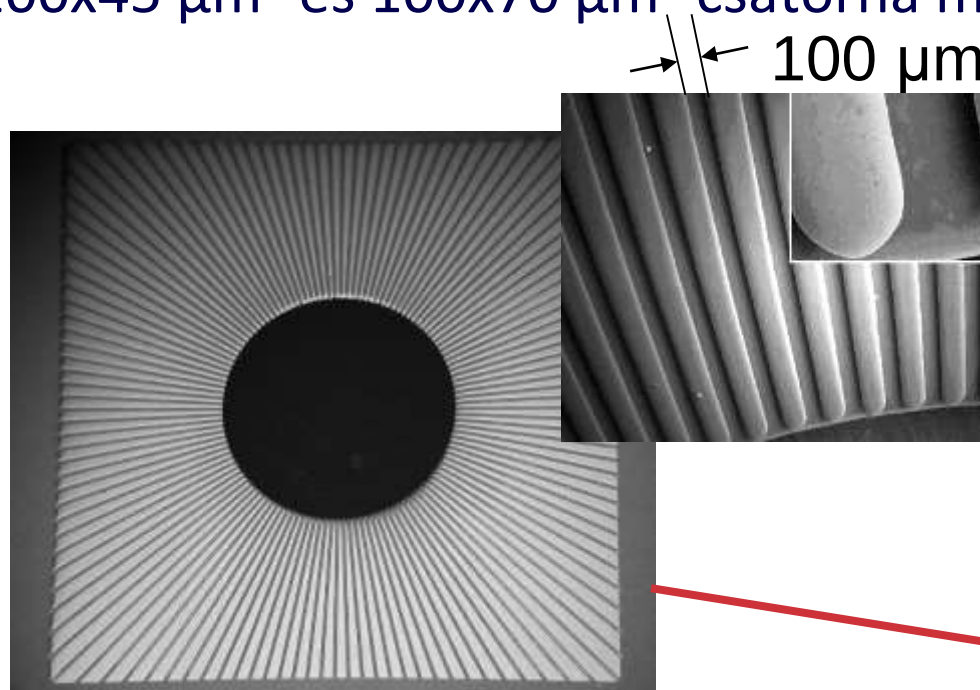


- ▶ 2005 FP6 projekt, együttműködés HWU-val
- ▶ Már látszott, hogy a 3D tokozás elkerülhetetlen elterjedése (More-than-Moore integráció) termikus tervezési problémákat vet fel.
- ▶ Akkoriban alkalmazott hűtőeszközök kezdték elérni a hűtőtéljesítményük maximumát, ezért az új típusú hűtőeszközök kifejlesztése iránti igény megnövekedett.
- ▶ Jelenleg (2019) maximum 150W disszipációjú FC tokozott eszközök hűtése oldható meg hagyományos hűtőbordával és levegős aktív hűtéssel.
- ▶ Számos irodalmi forrás szerint a lehetséges megoldás a mikroméretű hűtőeszközökben keresendő (Víz hűtőközegre áttérés elkerülésével):
 - Mikroméretű csatornákkal ellátott hűtőbordát helyezünk a félvezető chip hátoldalára, vagy
 - magában a szilíciumban kialakított mikroméretű csatornák hálózata.



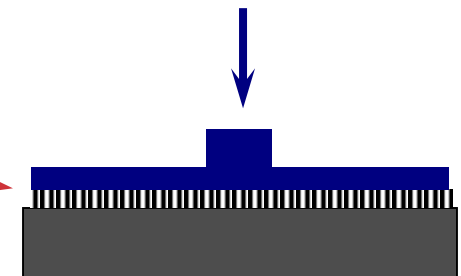
A vizsgált eszköz – MicroCooler

- ▶ Négyzet alakú, nikkel alapanyag, LIGA technológiával készült
- ▶ 128 csatorna radiális elrendezésben
 - Kialakítás, elrendezés ad-hoc, semmi előzetes vizsgálat nem történt az optimalizálásra (I, Y csatorna)
- ▶ $100 \times 45 \mu\text{m}^2$ és $100 \times 70 \mu\text{m}^2$ csatorna méretek



**Nagy R_{th} TIM
alkalmazása
elkerülhetetlen!**

Gáz beömlő nyílás



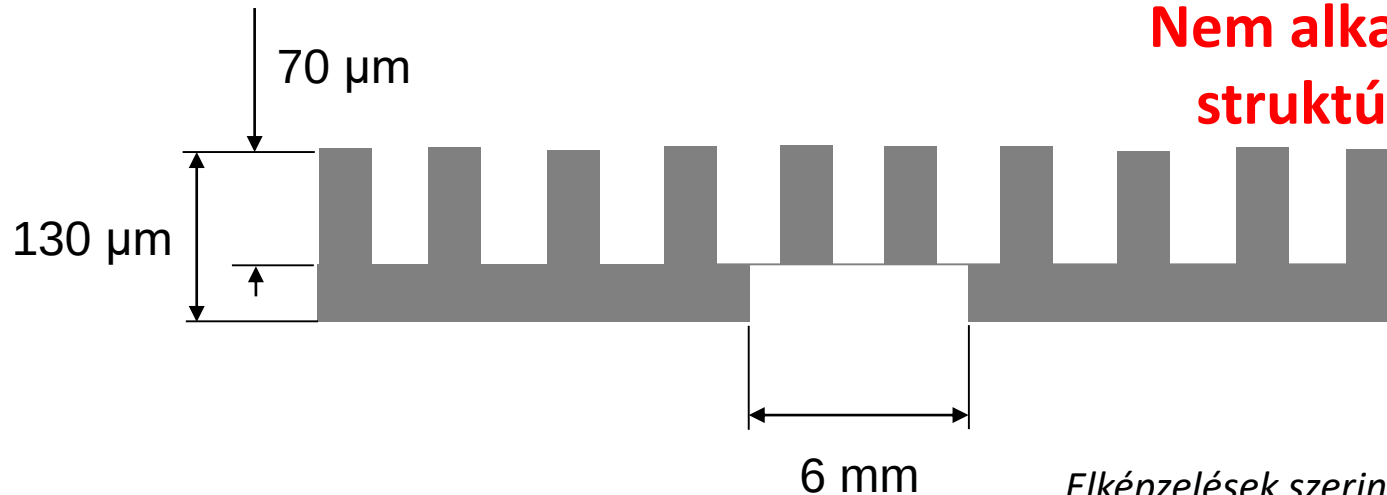
Hűtési kívánt integrált
áramköri tok



Patent EU Project
Heriot Watt University

A vizsgált eszköz – MicroCooler

**Nem alkalmazható 3D
struktúrák esetén!**



*Elképzések szerint a lyukba egy
mikroméretű ventillátor került volna...*

- ▶ 2009 PhD disszertáció
 - ▶ [Bognár György, A mikroelektronika egyes termikus problémáinak kezelése, BME, 2009](#)
- ▶ A fő cél a gáz áramlásának függvényében karakterizálni az eszközt termikus tranziens tesztelési eljárással.
- ▶ **A mikroméretű hűtőeszközök minősítésére még nem használt új mérési eljárást kidolgozása.**
- ▶ Párhuzamos hőutak egy részét nem vette figyelembe a mérés, nem volt validatív.

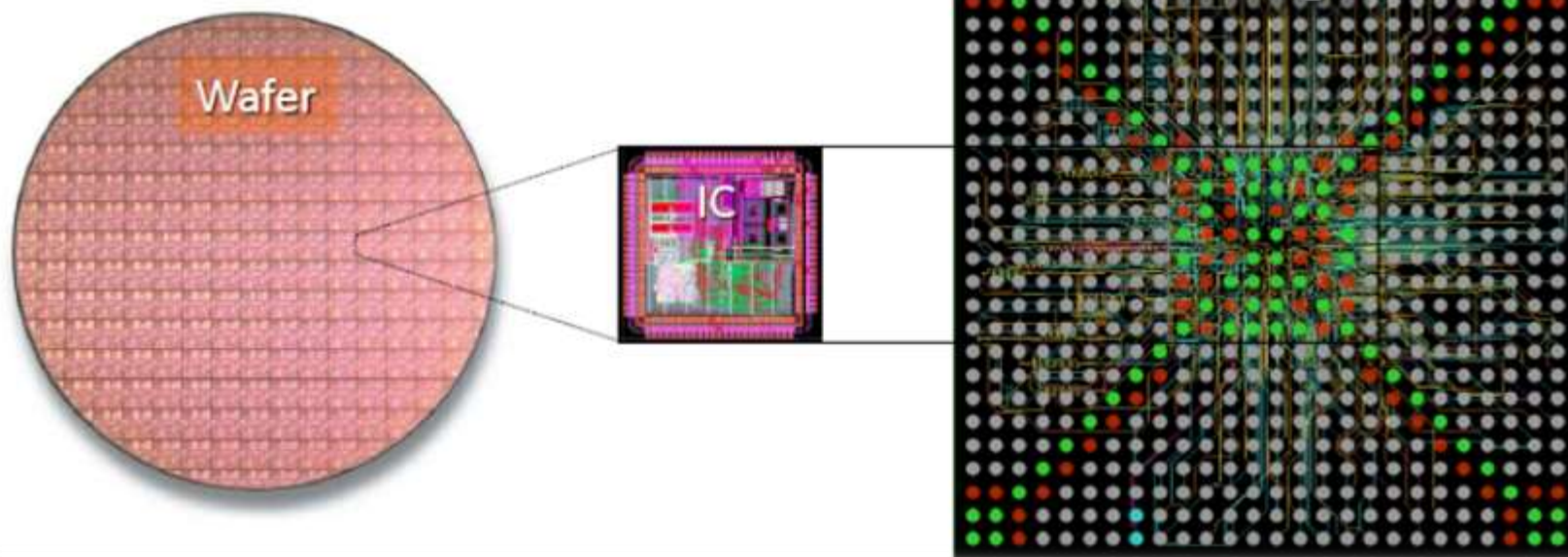
MODERN TOKOZÁSOK ÉS TERMIKUS JELLEMZŐIK



Áramkörü tokozások célja

► Tokozások fő céljai:

- Védelem a környezet hatásaitól
- Mechanikai rögzítés
- Elektromos kapcsolat biztosítása a külvilággal
- **Termikus működési határfeltételek biztosítása (megfelelő hőutak)**
- Átmenet biztosítása geometriai értelemben a NYHL és az IC között
- Jelkondicionálás IC és NYHL között

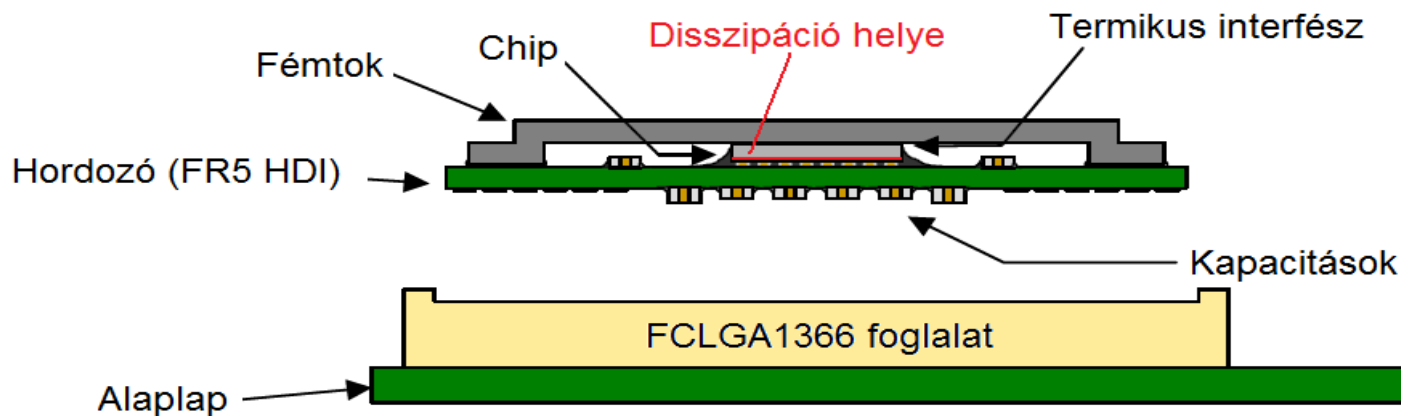
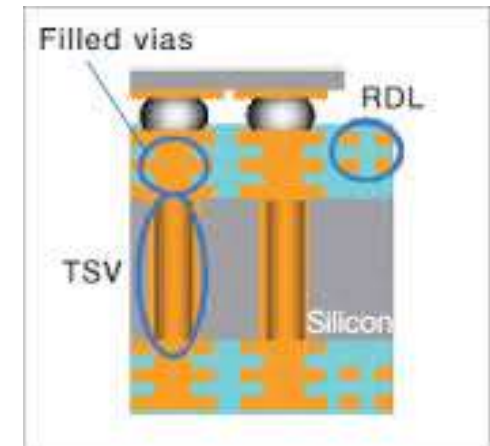


John Park, Mentor Graphics, Asia Symposium on Quality Electronic Design, 2011

Modern áramköri tokozások jellemzői

► Általános jellemzők

- Flip-chip technika alkalmazása domináns
- RDL (Redistribution Layer) alkalmazása
- Chip és tok teljes felületen kivezetések fan-in / fan-out tokozás egyaránt
- Több eszköz is egy tokban
- **Szilícium / LTCC anyagú köztes hordozó alkalmazása (interposer) FR5 helyett**
- TSV (through silicon via) alkalmazása
- PoP helyett Wafer Level Stacking (WLS)



Integrált rendszerek tokozása

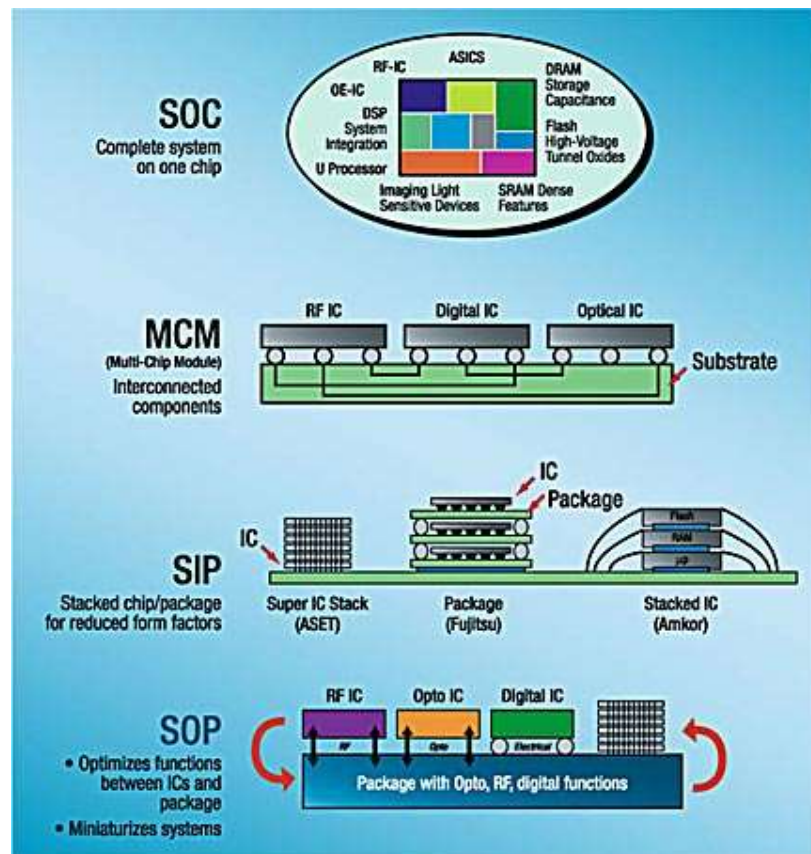
► Az áramkörüi környezet minimalizálása érdekében igyekszünk a komplett áramkörüi rendszert egy tokban megvalósítani

► A fő célok:

- Megbízhatóság növelése
- Az **áramkörüi környezet maga a tokozás**, feladata nem csak a hordozás, védelem
Pl.: LTCC köztes hordozó FCBGA

► Főbb fogalmak:

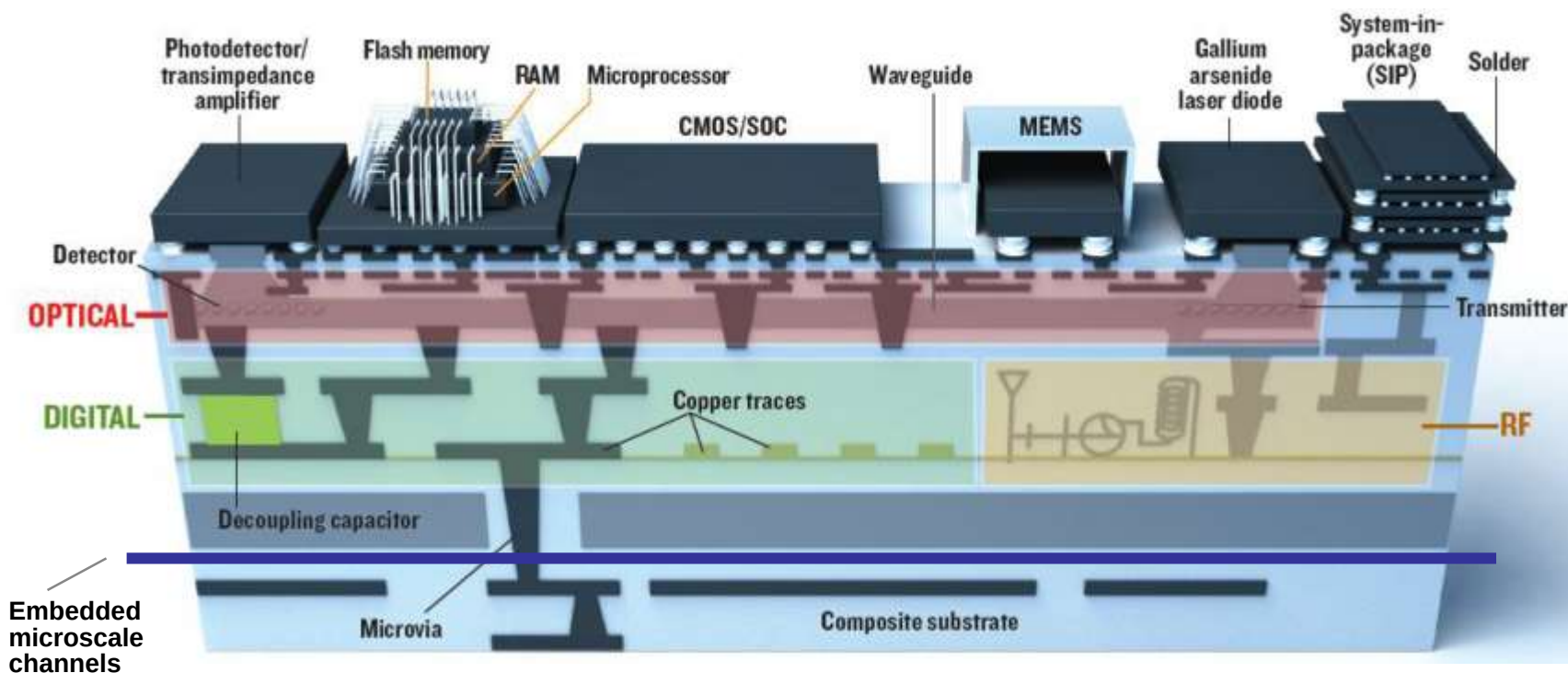
- **MCM / MCP** – Multi Chip Module / Multi Chip Package
- **SoC** – System on Chip
- **SiP** – System in Package
 - **PoP** – Package on Package
 - Stacked dies / 3D packaging
- **SoP** – System on Package



By Prof. Rao R. Tummala,
Packaging Research Center,
Georgia Institute of Technology, Atlanta

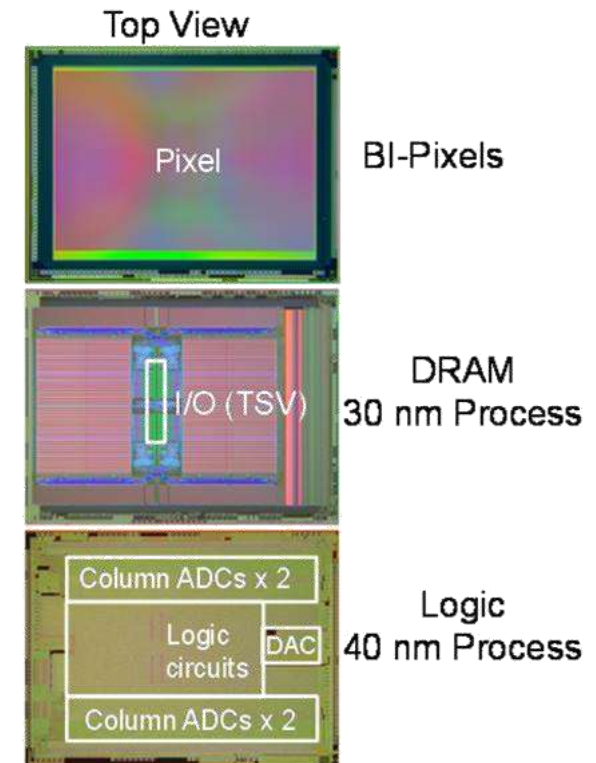
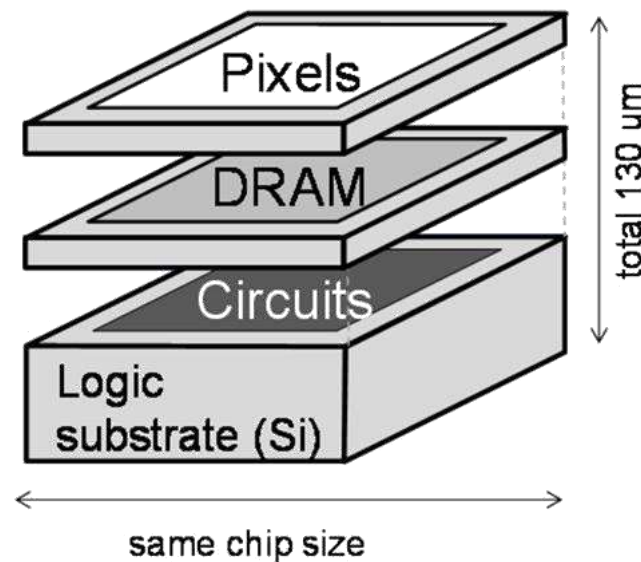
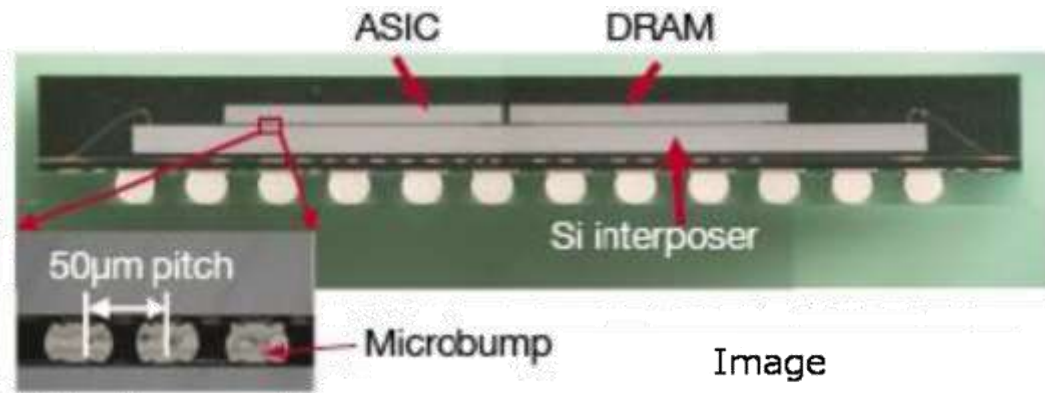
Integrált rendszerek tokozása

► System-on-Package konstrukció



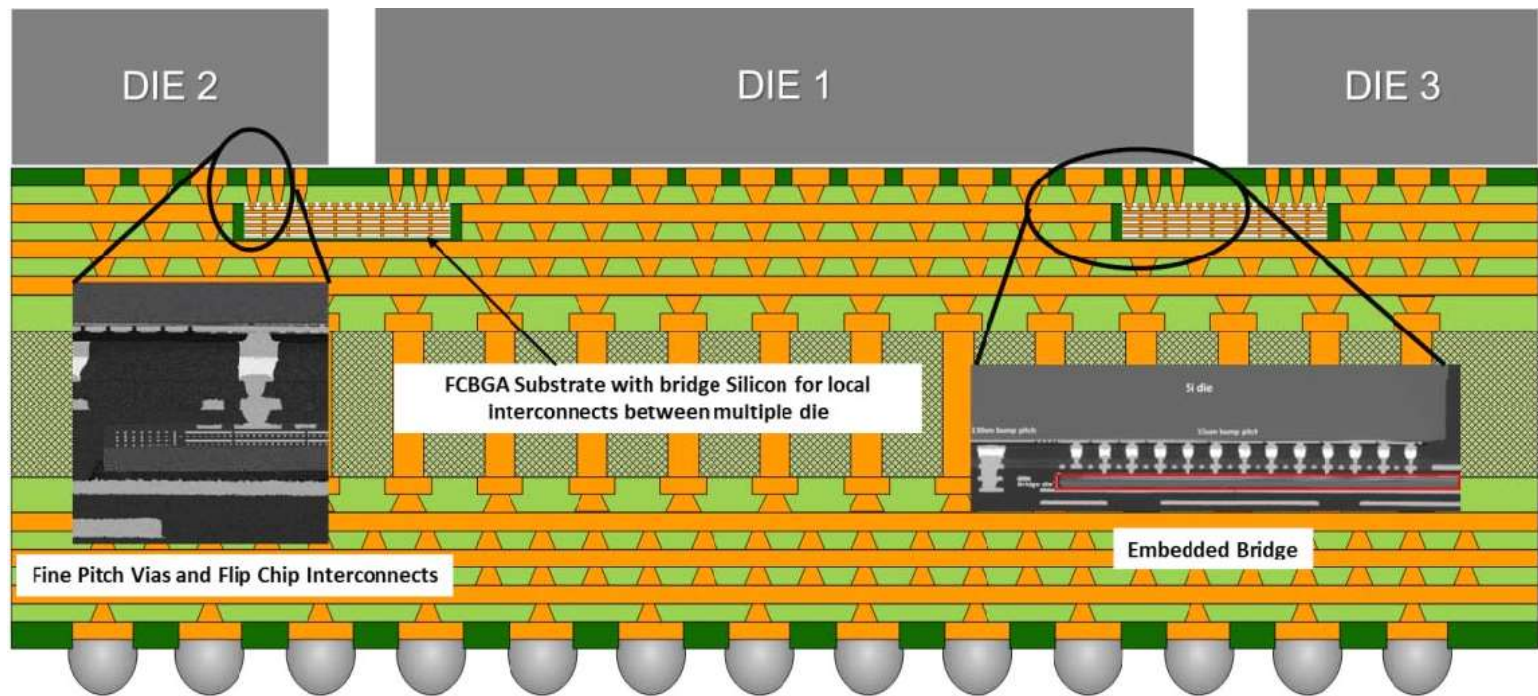
By Prof. Rao R. Tummala,
Packaging Research Center,
Georgia Institute of Technology, Atlanta

Modern System-in-Package rendszerek



Modern System-on-Package rendszerek

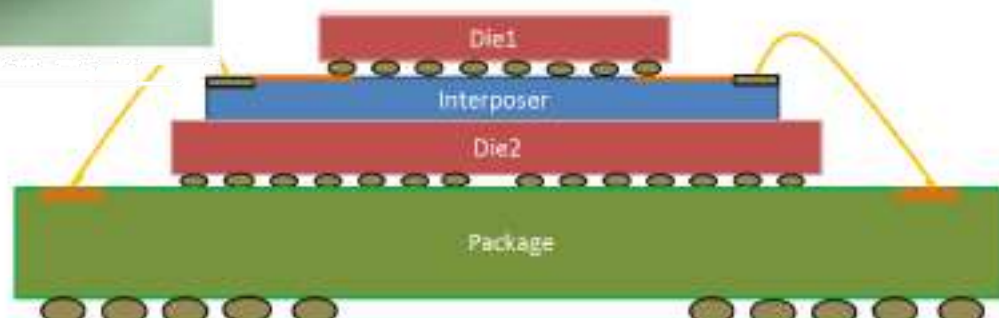
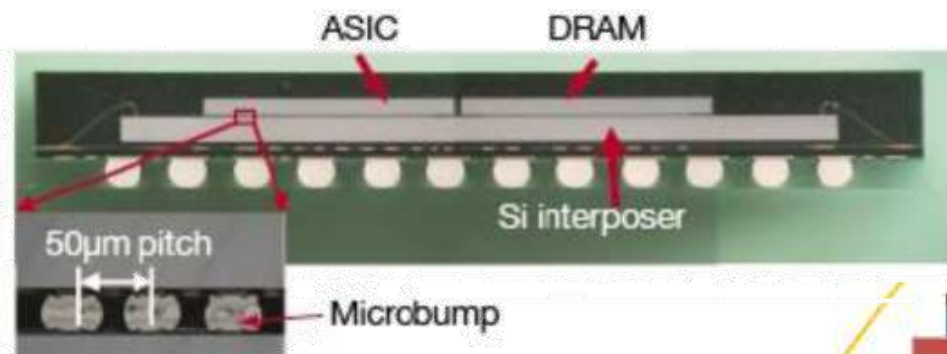
- ▶ Intel EMIB – Embedded Multi-Die Interconnection Bridge
- ▶ TSV használat elkerülhetővé válik, gyors összeköttetések az egyes chipek között.
- ▶ Félúton a teljesen szilícium alapú köztes hordozó felé.



Modern köztes hordozó struktúrák

► Lehetővé teszi szilícium köztes hordozó (interposer) használatát.

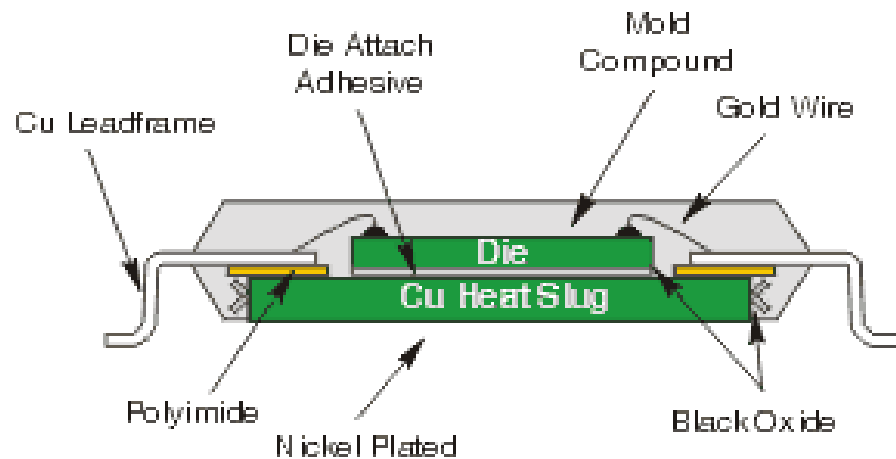
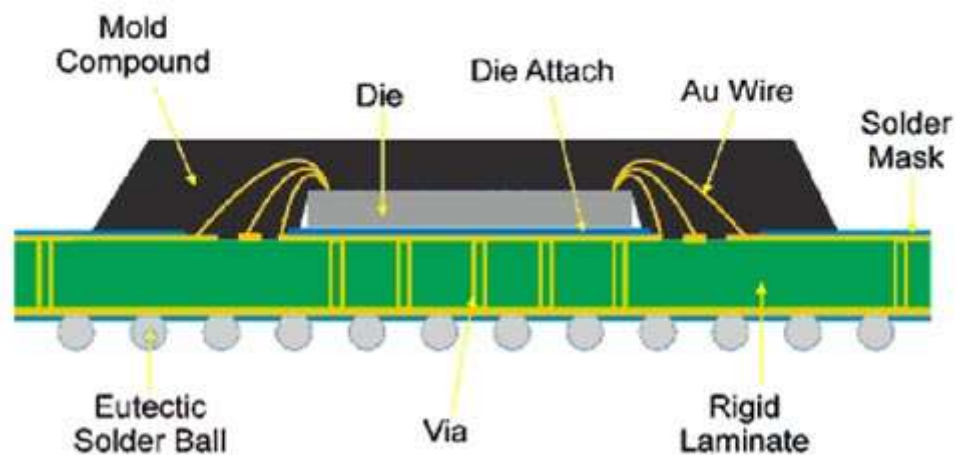
- TSV technológia alkalmazása
- Nem több rétegű struktúra!!!! (mint LTCC esetén)
- Egy félvezető rajta több vezetékezés réteg (tipikusan 2-3)
- Hagyományos integrált áramkörhöz hasonló, DE nincsenek aktív eszközök rajta, csak a kivezetések újrelosztása a feladata.
- Vékonyabb, mint kerámia vagy FR5 esetén → kisebb R_{Th}
- Lin. hőtágulási együtthatók különbségéből adódó problémákra ad megoldást
- Régi FAB új célok...



Hőutak modern eszközökben

- Tipikusan 1D hőúttal számolunk (wirebond technika)

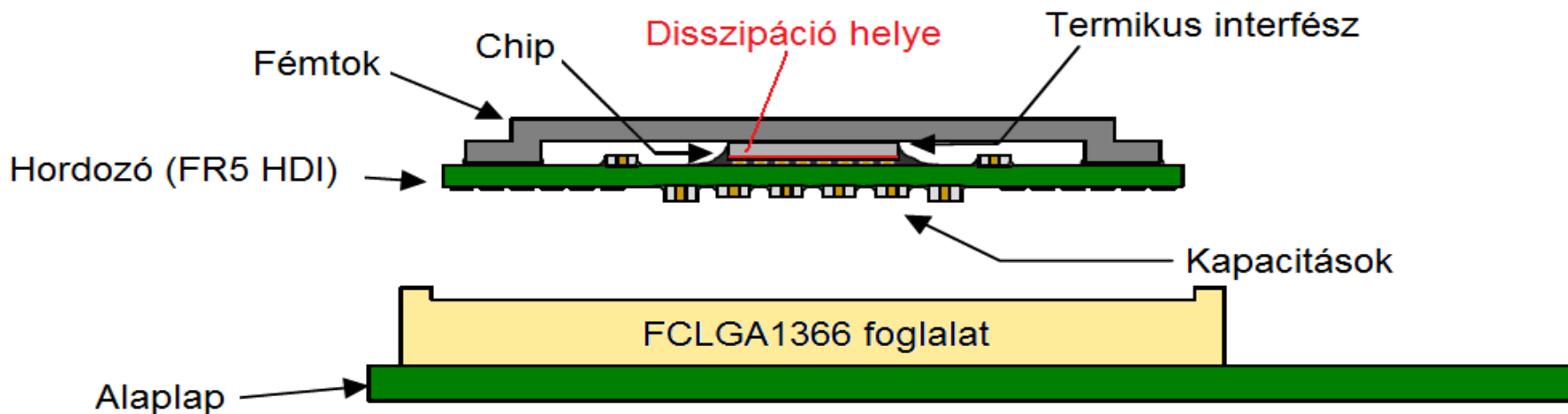
Typical Multi-tier Wire Bond (PBGA) Package



http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1225866

Hőutak modern eszközökben

- ▶ Modern tokozásoknál tipikusan 1D hőúttal számolunk
- ▶ Pedig az alaplapp felé is jelentős a hőáram!
- ▶ Tudnánk ezt az összetevőt növelni?
 - Azaz csökkenteni az „alaplapp felé a hőellenállás értéket?

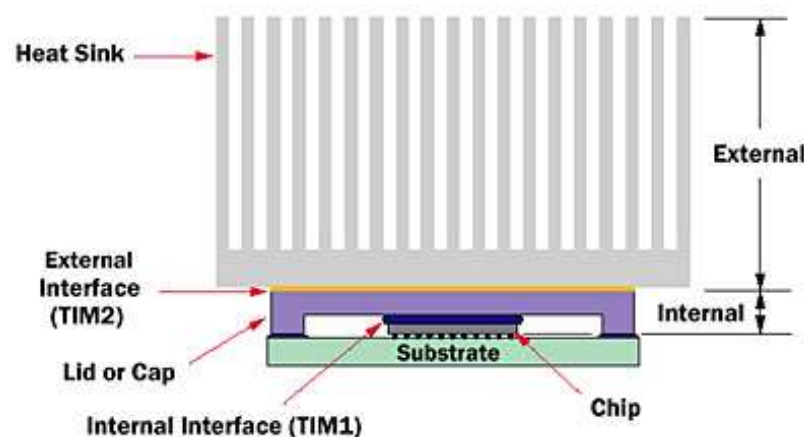


**Modern szilícium / LTCC köztes hordozókban
kialakított csatornákkal két irányú hőút
biztosítása!**

Hűtőeszköz kiválasztása

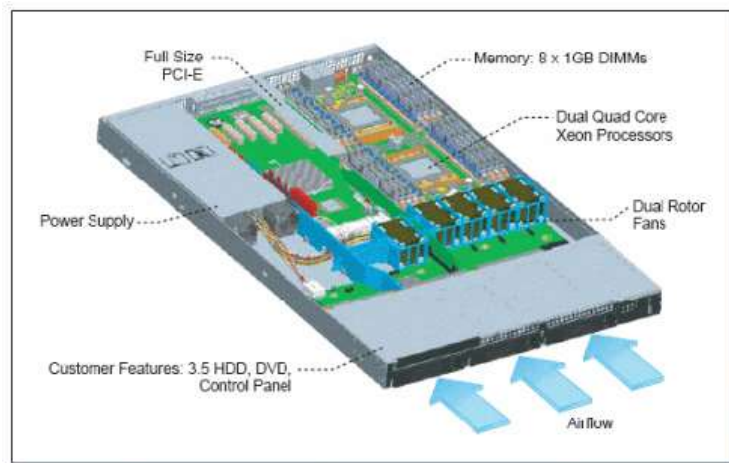
► Legfontosabb szempontok és tényezők:

- Ár ~ anyag / kidolgozottság (pl.: leggyakrabban alumínium vagy réz, de egzotikus eszközök – heat pipe – különféle drága megmunkálási lépések)
- Méret / geometriailag befér e a megadott helyre (pl.: rack fiók)
- Tömeg / orientáció (pl.: Ha rázkódás éri kibírja e? Rajta marad a hűtendő eszközön?)
- Működési határfeltételek (pl.: heat pipe adott hőmérséklettartományban tud csak hatékonyan működni)
- Ergonómia (pl.: zajártalom kérdése, rezgés, stb.)



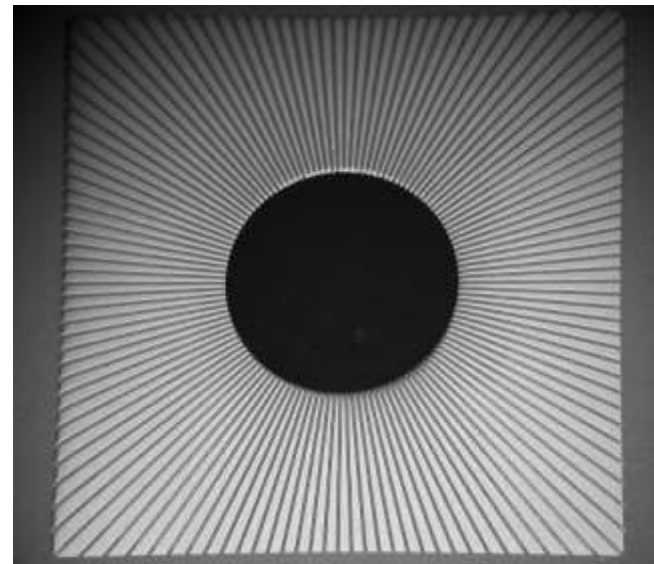
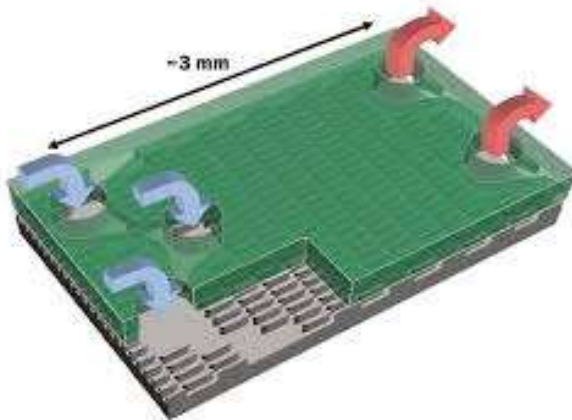
Integrált mikrocsatornás hűtőeszközök

- ▶ A kisméretű, mobil eszközökben a hűtés szerepe kritikussá vált
 - Mobiltelefonok, tabletek számítási teljesítménye termikus okokból limitált
 - Architekturális és szoftveres megoldásokkal védik meg a túlmelegedéstől
 - Ennél jobb megoldást kell találni!
- ▶ Olyan helyeken ahová nem fér el hagyományos nagyméretű hűtőeszköz
 - Adat- és telekommunikációs központok
- ▶ A legkisebb hőellenállású és legrövidebb (*legkevesebb anyagi átmenet & TIM biztosítása*) hőutat kell biztosítani
- ▶ Központi kutatási témává vált az ilyen integrált hűtőeszközök készítése és termikus karakterizációja
 - Aktív kutatási téma jelenleg is a EET tanszéken.



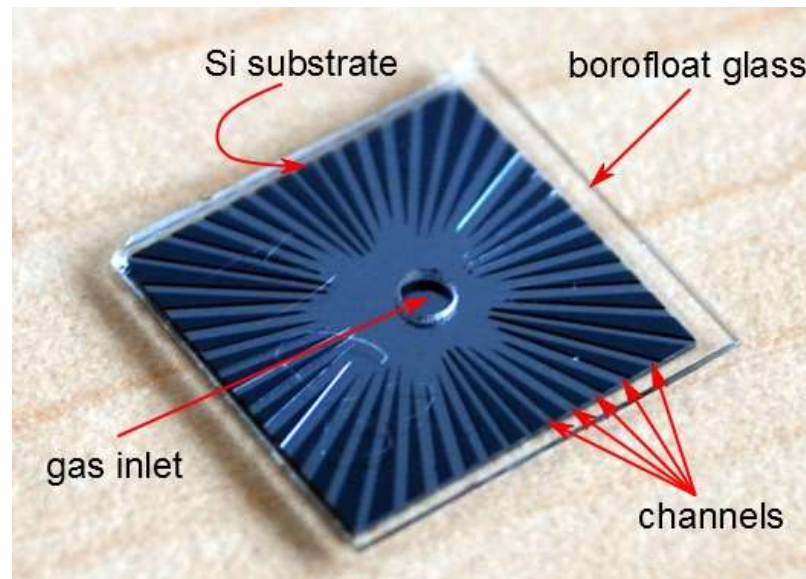
Mikrohűtőeszköz kialakításának helye

- ▶ Két alapvető kialakítási koncepció létezik
- ▶ 1. Ha külön eszközön valósítjuk meg a mikrohűtőbordát
 - Előnye: szinte bármilyen fémből, bármilyen technológiával elkészíthető, nem kell foglalkozni kompatibilitási kérdésekkel
 - Hátránya: a rögzítés (TIM) plusz hőellenállást visz a rendszerbe, eltérő hőtágulási együttható esetén a szilícium-lapka károsodhat, delamináció előfordulhat

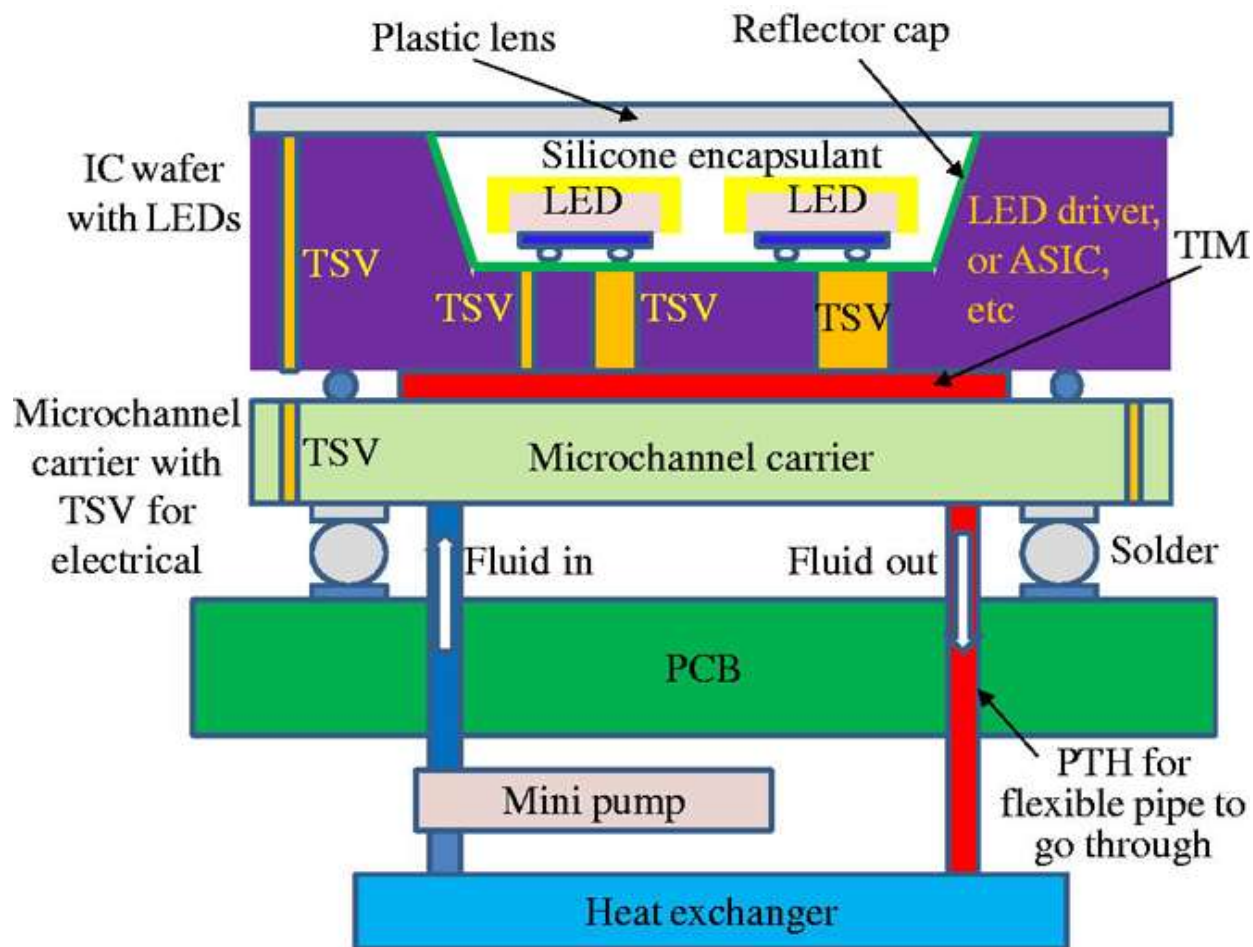


Mikrohűtőeszköz kialakításának helye

- ▶ Két alapvető kialakítási koncepció létezik
- ▶ 2. Ha magában a szilícium-lapka hátoldalában készítjük el a hűtőeszközt
 - Előnye: így a legrövidebb hőút, nincs ragasztás
 - Hátránya: gyártási kompatibilitási kérdések, korlátozott csatornamintázat-variációk



Mikrohűtőeszköz kialakításának helye



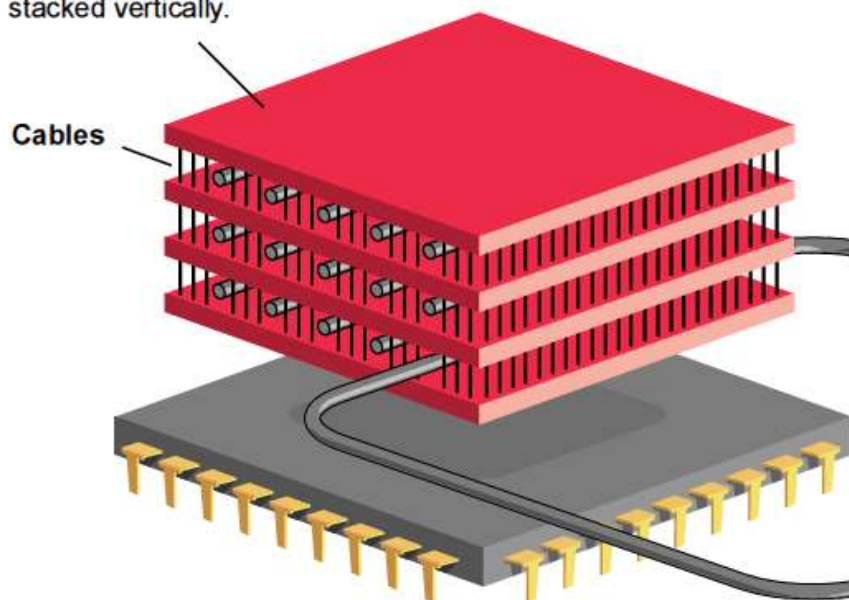
[1] John Lau, Ricky Lee, Matthew Yuen, Philip Chan, (2010) "3D LED and IC wafer level packaging", *Microelectronics International*, Vol. 27 Iss: 2, pp.98 - 105

Mikrohűtőeszköz kialakításának helye

► Inter-tier hűtés – Lapkák között valósítjuk meg a csatornákat

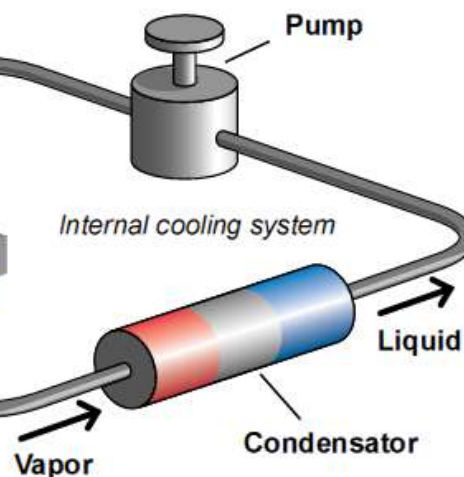
Tomorrow's 3D microchips

Cores - The cores are no longer placed side-to-side but stacked vertically.



100 connections per mm² link the cores over their entire surface. Advantages:

- Data transfer between the cores is many times faster.
- The processor consumes less energy.
- The processor generates less heat.



Channels - As thin as a human hair (50 microns), the channels filled with cooling water or evaporating refrigerant traverse the 3D microchip to maintain the optimal operating temperature.

Reference: EPFL, LTCM, John R. Thome
Infograph: Pascal Coderay, pascal@salut.ch

Hőátadási tényező

- ▶ Az integrált és makroméretű hűtőeszközök összehasonlítása
 - Chip méretben kell a legjobb hűtési hatásfokot elérni
 - Olyan mérőszámra van szükség, amely a mérettől független
- ▶ Az integrált hűtőeszközök összehasonlítására alkalmas mérőszám a **hőátadási együttható**
 - Megadja, azt a hőmennyiséget, amely egységnyi felületen (test és az érintkező hűtőközeg között) egységnyi hőmérséklet-különbségnél, egységnyi idő alatt kicserélődik.
 - $$h = \frac{\Delta P}{A \cdot \Delta T}$$
- ▶ Ennek felhasználásával a termikus ellenállás számolható, meghatározható (heat sink adatlapokon is R_{TH} szerepel)

TOKOZÁSOK TERMIKUS MODELLEZÉSE

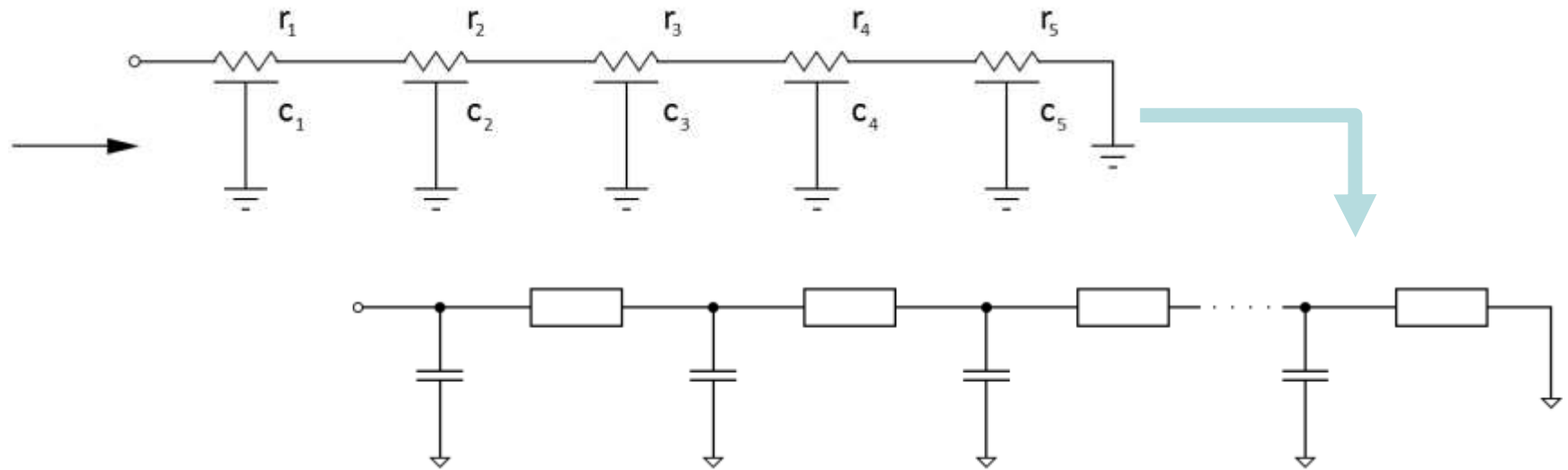


Termikus kompakt modell alkotás

- ▶ Az integrált áramkör tervezésénél (alkatrészek elrendezésénél) **hőtechnikai szempontokat is figyelembe kell venni!**
 - LogiTherm, CellTherm, elektro-termikus közös szimulációk futtatása.
 - Azonban az alkatrész elrendezését nem csak hőtechnikai, hanem jelterjedési és geometriai „kényszerek” is korlátozzák.
- ▶ Komoly problémát jelent, hogy egy-egy alkatrész elrendezés esetén a hőtani szimulációk futtatása akár több óráig is eltarthat.
- ▶ A mikroméretű hűtőeszközök csatornáinak fala mentén történő hőátadást **egyszerűsített modellel** közelíthetjük!

Termikus kompakt modell alkotás

- Kompakt modell alkotás célja, hogy az eszközök termikus viselkedésének „leírásához” **ne kelljen parciális differenciál egyenleteket megoldani**, hanem elegendő legyen lineáris egyenletrendszereket kezelni.
- Termikus hálózatoknál elosztott paraméteres modellezés helyett **elegendő lehet megfelelő pontosságú koncentrált paraméteres RC létrával leírni a rendszert**



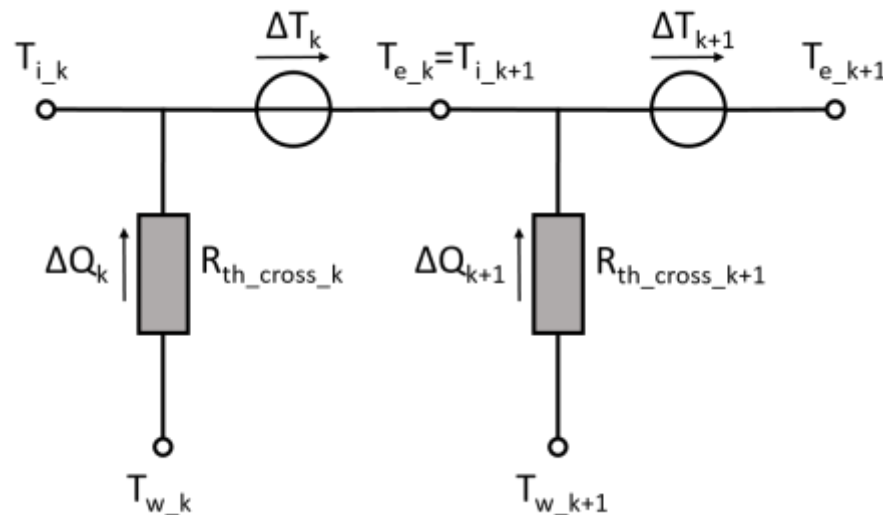
Termikus kompakt modell alkotás

- ▶ Kompakt modell alkalmazásával gyorsan, akár kvázi valós időben kiszámíthatóvá válik, hogy
 - egy-egy szegmensből mekkora hő adódik át a csatornában áramló hűtőközegnek,
 - a hűtőközeg mennyire melegszik fel,
 - milyen áramlási sebességre, milyen geometriájú (szélességű) csatornára van szükség az adott hőmennyiség elvitelére.
- ▶ Így lehetővé válik a tervezés korai szakaszában **hőtechnikai szempontokat is figyelembe venni az alkatrészek elrendezésének, a hűtőrendszer kialakításának tervezésekor.**
- ▶ Logi/elektro-termikus szimulációs eszközökhöz is kapcsolható, **a teljes áramkör elektromos működése a kártyát körbevevő ún. áramköri környezetnek és a kialakított hűtőrendszer termikus tulajdonságainak figyelembevételével vizsgálható.**

Termikus kompakt modell alkotás

► Analitikus alapokon nyugó kompakt modell alkotás

- A pontos geometria és a hőátadási folyamatok ismerete/azonosítása szükséges
- Hőátadási folyamatok (radiatív, konvektív) analitikus / nem lineáris leírása
- Analitikus összefüggés alkotható többek között:
 - Közeg áramlási sebességétől függő hőellenállás értékre
 - Sugárzásos hőátadás időállandójának meghatározására

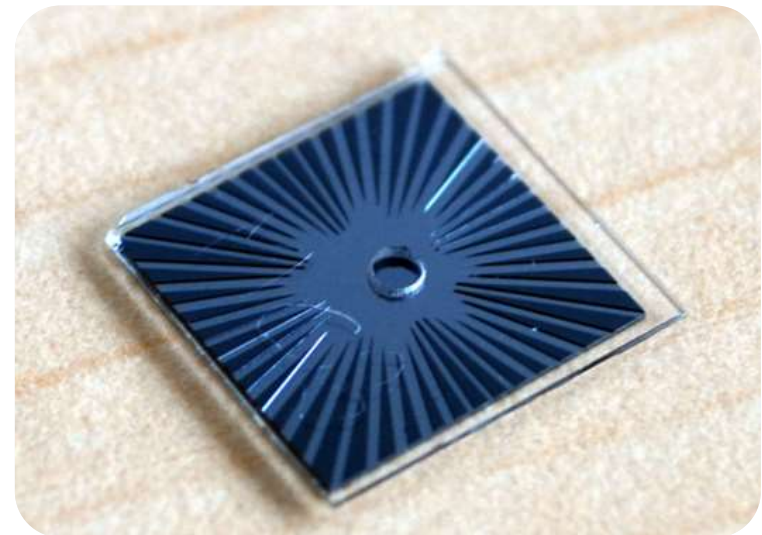
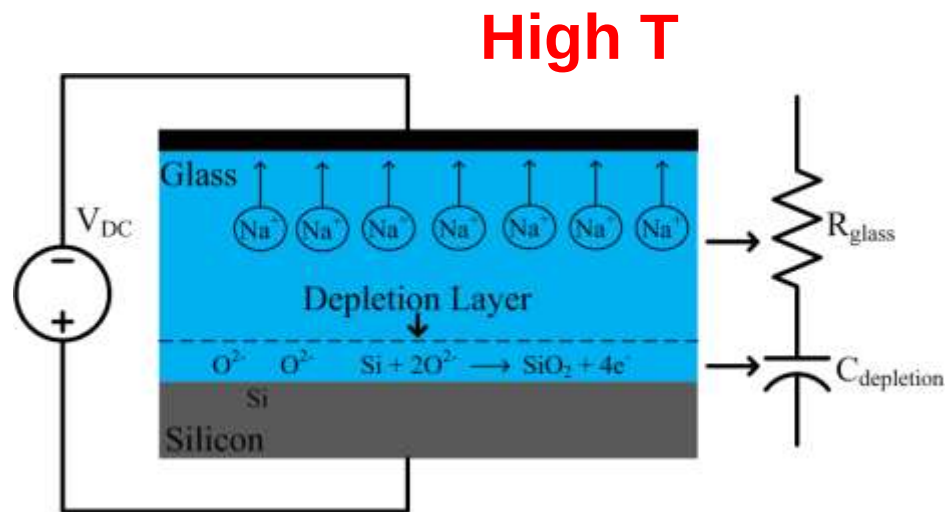


MIKROCSATORNÁS HŰTŐESZKÖZÖK KARAKTERIZÁLÁSA



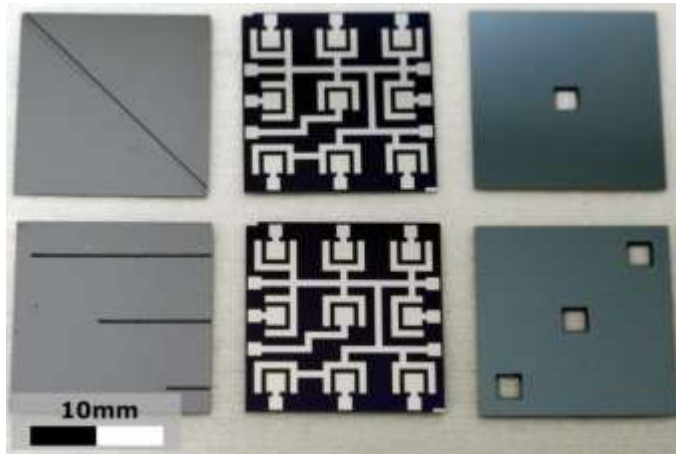
A vizsgált struktúra I.

- ▶ A hátoldalon kialakított mikroméretű - nedveskémiai marással kialakított - csatornákat tartalmazó struktúra (TMAH 100 és 110 orientációjú szeleteken)
- ▶ Radiális csatorna elrendezés (összehasonlítható legyen a LIGA technológiával megvalósítotthoz)
- ▶ Csatornák üveglappal lezárva
 - Anódikus bondolás, BoroFloat

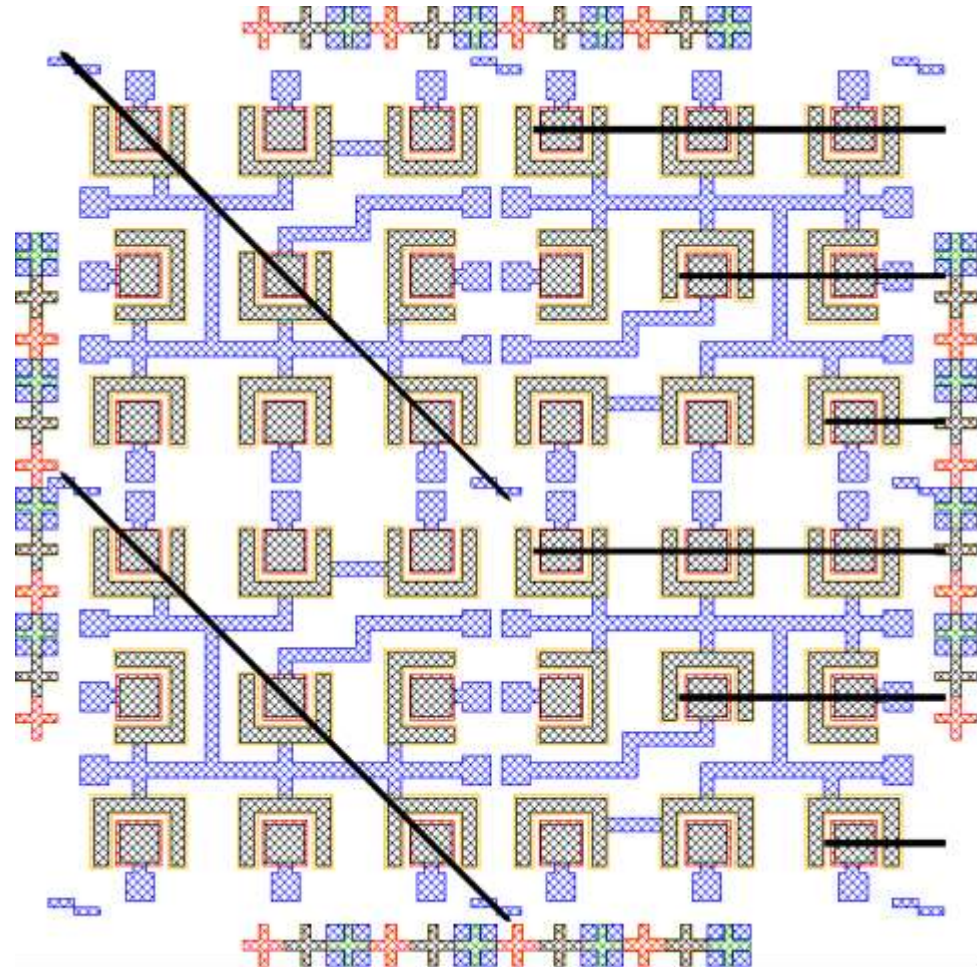


A vizsgált struktúra II.

- ▶ Aktív eszközöket és a hátoldalon kialakított mikroméretű csatornákat tartalmazó struktúra

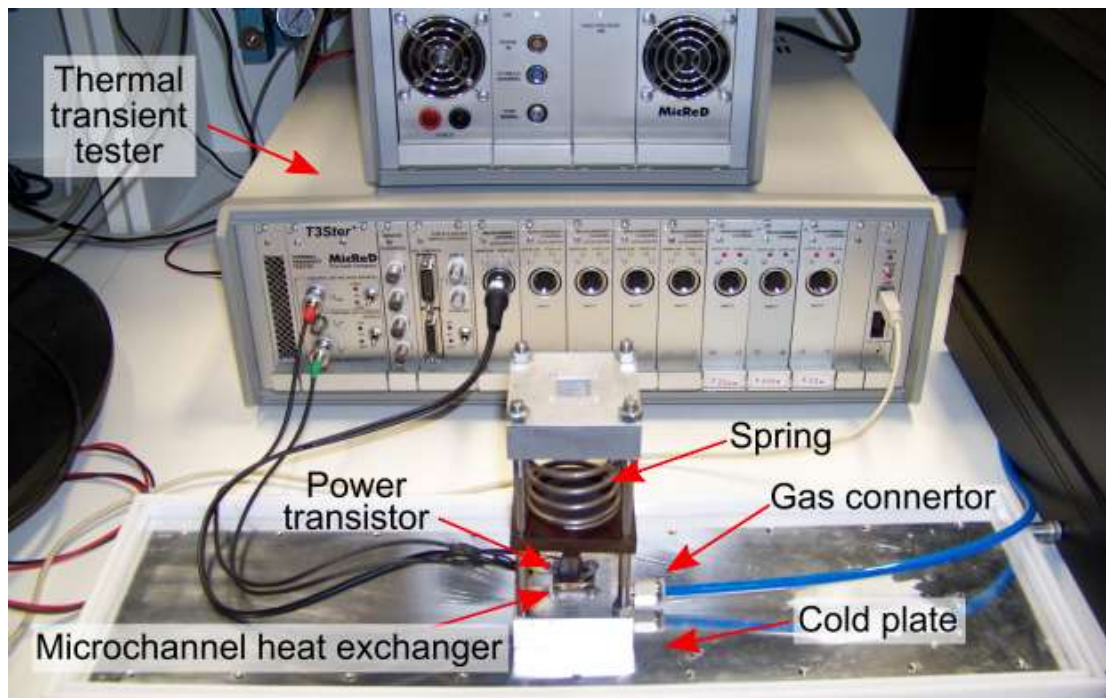


-  – n+ diffusion mask
-  – p diffusion mask
-  – Contact window mask
-  – Metallization mask
-  – TMAH etching mask (on the back side)



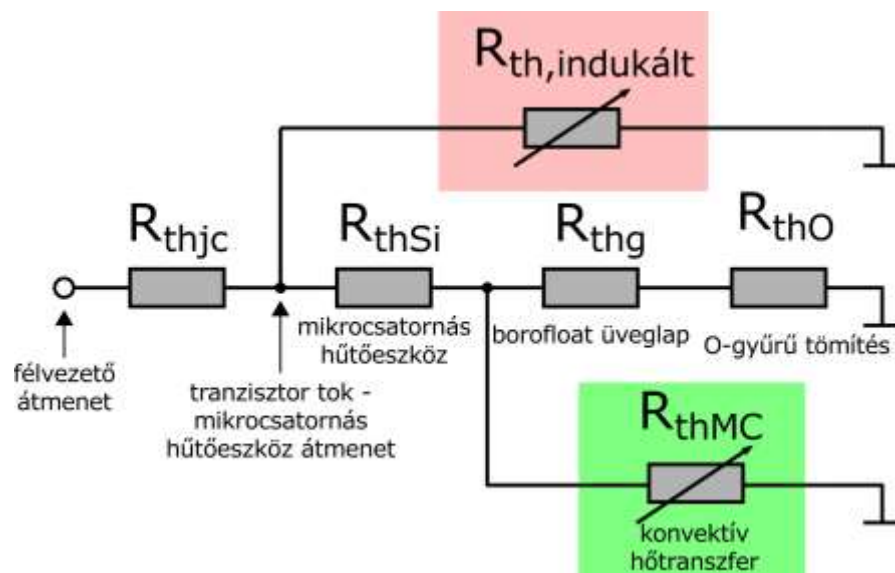
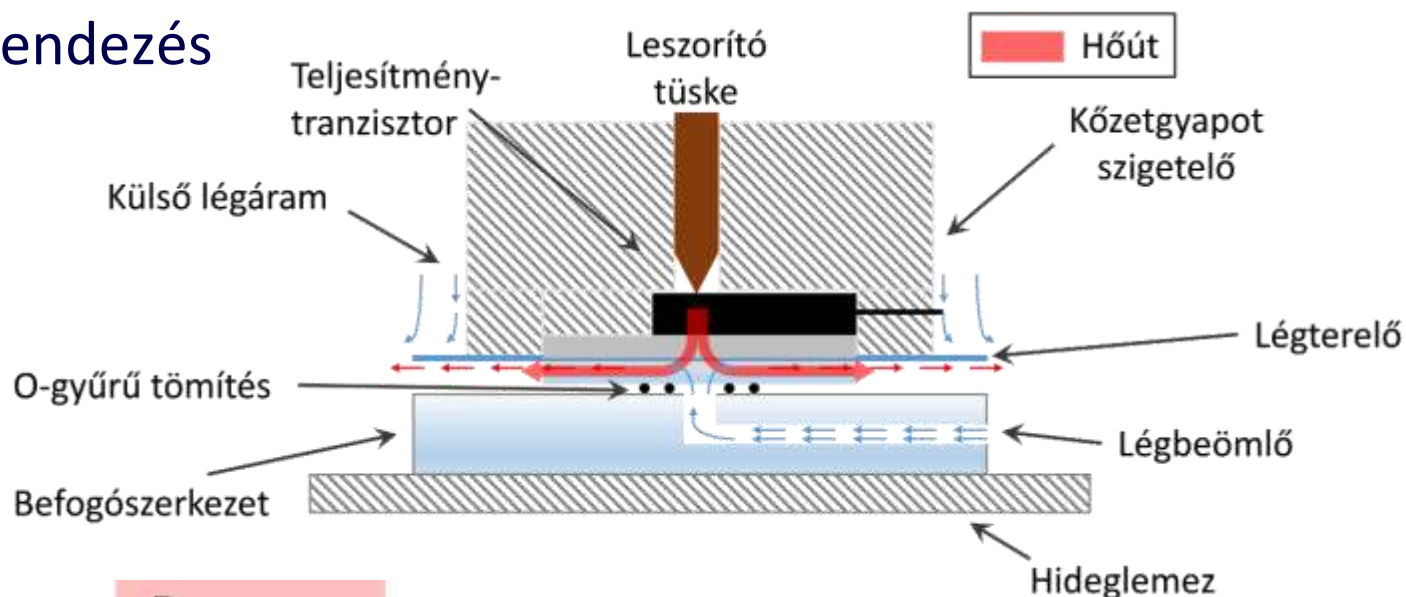
Mikrohűtőeszközök karakterizálása

- ▶ A cél a áramlási ráta függő parciális hőellenállás **validatív** meghatározása.
- ▶ A kidolgozott mérési elrendezés a termikus karakterizációhoz.
- ▶ 2018, PhD Értekezés
 - ▶ Takács Gábor, Integrált mikrocsatornás hűtőeszközök modellezése és karakterizációja, BME, 2018



Mikrohűtőeszközök karakterizálása

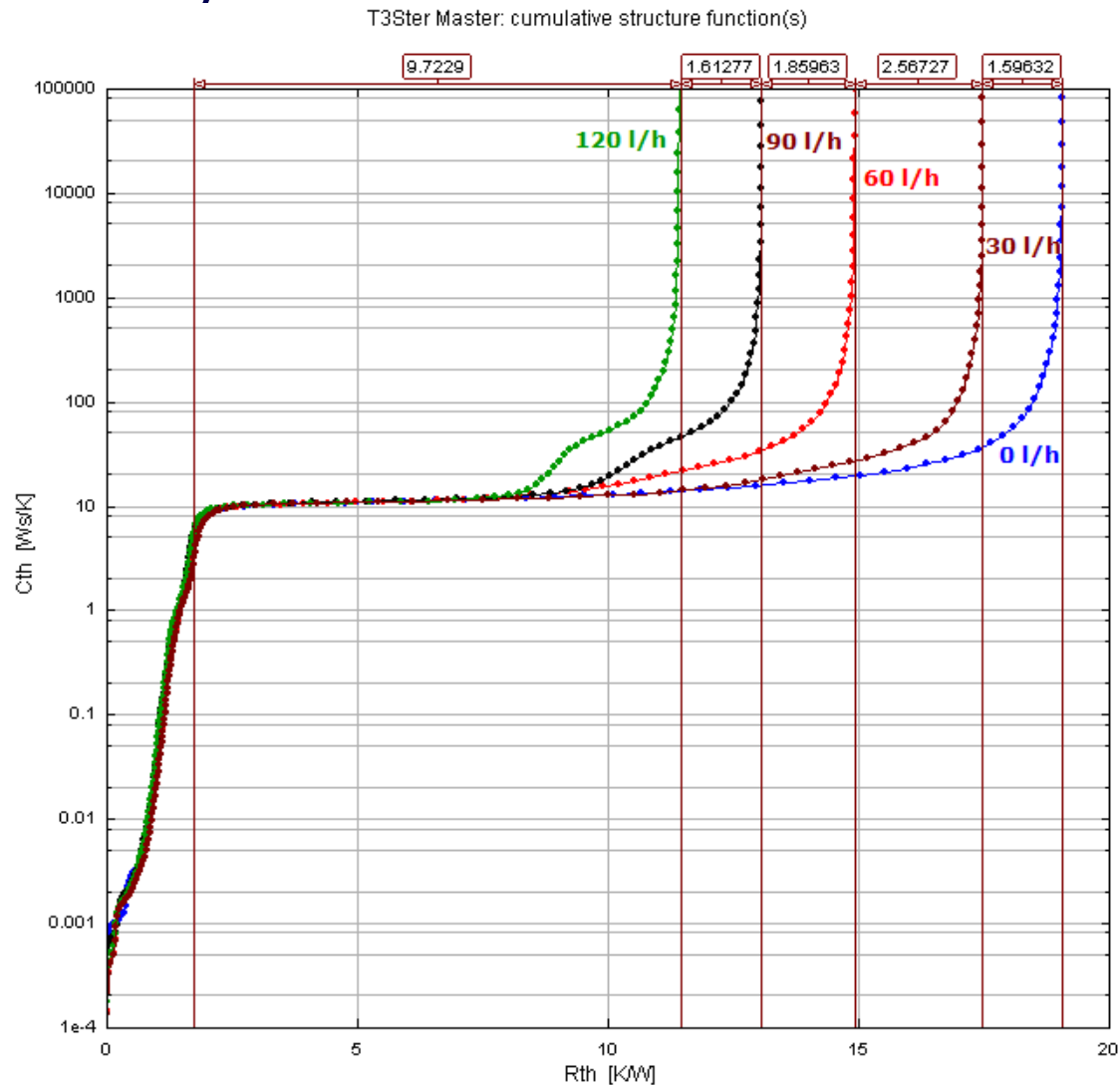
► Mérési elrendezés



$$R_{thMC} = \frac{(R_{thg} + R_{thO})(R_{thjc} - R_{th})}{R_{th} - R_{thjc} - (R_{thg} + R_{thO})}$$

Mikrohűtőeszközök karakterizálása

► Mérési eredmények

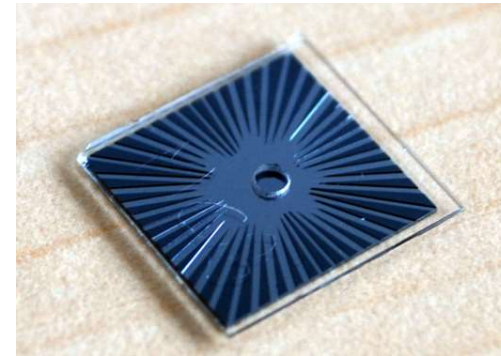


Mikrohűtőeszközök karakterizálása

► Mérési eredmények

Áramlási ráta [l/h]	Számolt hőellenállás [K/W]	Szimulált hőellenállás [K/W]	Mért hőellenállás [K/W]	Eltérés
30	99,1	103	92,2	8%
60	49,6	51,1	49,9	1%
90	33,4	34,4	34,9	2,8%
120	25,6	26	26,9	4,3%

Makro vs. mikro hűtőeszköz



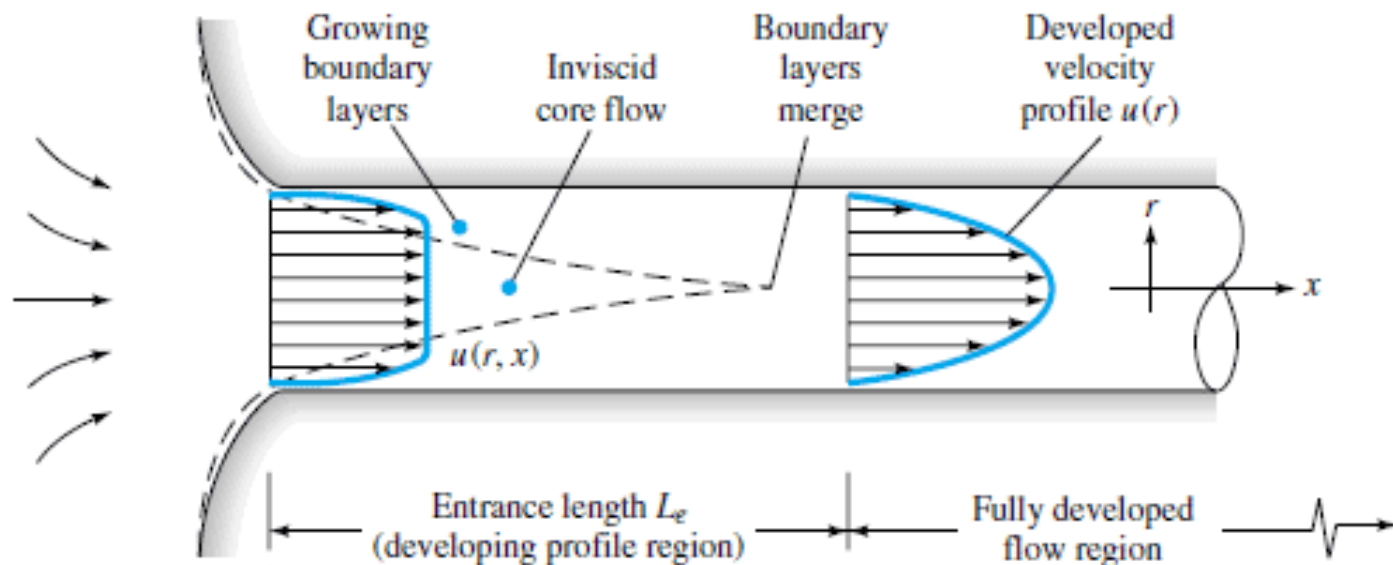
	Spire Gemini Rev.3	Mikroméretű hűtőeszköz			
Áramlási sebesség	125 000 l/h	30 l/h	60 l/h	90 l/h	120 l/h
Átlagos hőátadási együttható	$8 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$201 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$453 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$754 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$1130 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

MIKROCSATORNÁS HŰTŐESZKÖZÖK TERMÍKUS MODELLEZÉSE



A közegáramlás jellege

- ▶ A csatorna bemeneti tartományában még nem alakul ki a végleges áramlás jellege
- ▶ Hidrodinamikai belépési hossz tartományban turbuleshez hasonló
- ▶ Ebben a tartományban jelentősen megnő a hőátadás



Velocity Profile of Fluid in a Pipe (laminar Flow)

Áramlástan alapjai

► Reynolds-szám

- A zárt csatornában áramló közeg áramlásának jellegére lehet következtetni
- Mértékegység nélküli viszonyszám!

$$Re = \frac{L \cdot \rho \cdot v}{\mu} = \frac{L \cdot v}{\nu}$$

- L – jellemző hossz méret
- v – közeg átlagos áramlási sebessége
- μ - dinamikai viszkozitás
- ν - kinematikai viszkozitás
- Áramlás jellege (makroméretű csatornák esetén):
 - 2.300 alatt biztosan lamináris
 - 10.000 érték felett biztosan turbulens
 - 2.300 – 10.000 között átmeneti állapot

**Mérésekkel
bizonyítottuk,
hogy $Re=700$ felett
turbulens áramlás**

A modellezés alap kérdései

► Cél meghatározni a hőátadás hatékonyságát!

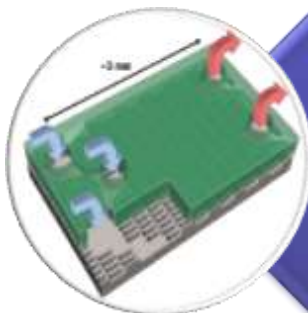


Tervezési és modellezési szempontok



Hűtőközeg

- Víz - $P_{MAX}=1\text{bar}$
- Levegő
- N_2
- Szivárgás elkerülése



Layout

- Csatornahossz - Termikus belépési hossz
- Csatornahálózat
- Csatorna mélység, szélesség - Tech. paraméter



Egyszerűsítések

- Homogén hőm. eloszlás – $T_{\text{substrate}}$ vagy T_{segment}
- Fázisváltással nem számolunk
- Parallel hőutakat elhanyagolhatóak

R_{TH_JA} modellezése – egy csatorna

Mikrocsatorna

- 1 Inlet
- 1 Outlet
- L hosszúságú

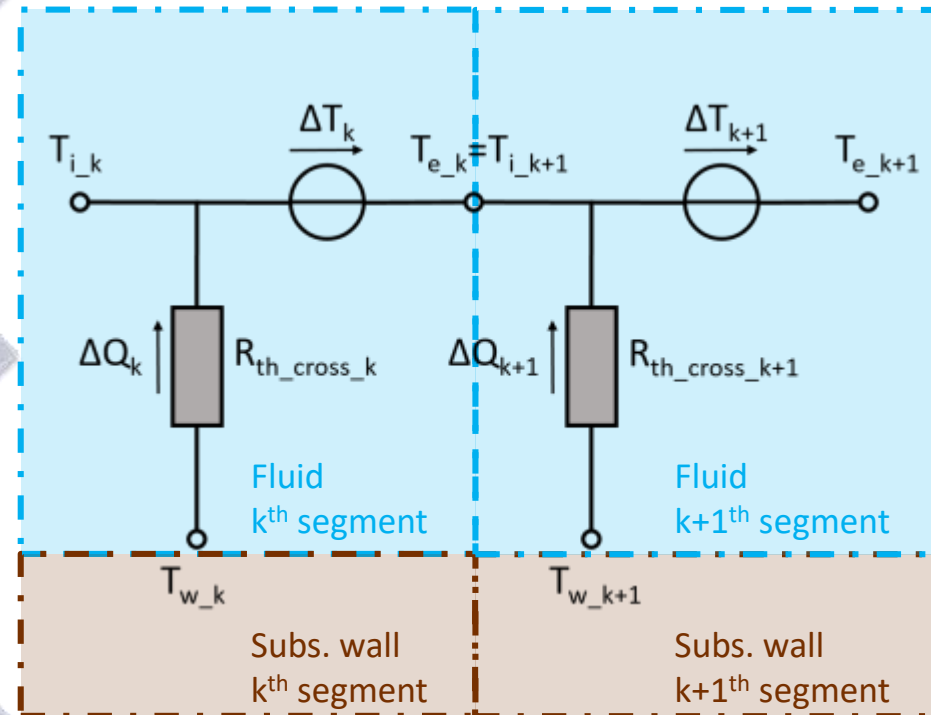
Áramlás

- Közegáramlás sebessége
- Áramlás és az áramoltatott közeg tulajdonságai

Csatorna geometriai kialakítása

- Trapéz vagy téglalap alakú keresztmetszet

Cél: egyetlen csatorna kompakt modelljének előállítása



Modellalkotás

- ▶ Energiamegmaradás alapján a hővezetés a csatornán áramoltatott közegen keresztül a környezet és a csatorna fala között:

$$R_{TH_cross_k} = \frac{1}{\frac{dm}{dt} \cdot c_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{h \cdot A}{\frac{dm}{dt} \cdot c_p}}\right)}$$

- ▶ Egyedüli az áramlás tulajdonságaitól függő érték:

$$h = \frac{k_f \cdot Nu}{D_H}$$

- k_f – közeg fajlagos hővezetése
- Nu – Nusselt szám az adott áramlásra vonatkozóan, meghatározható (analitikus és/vagy empirikus alapokon nyugvó megközelítések)

$$Nu = 3.66 + \frac{0.065 \cdot (D_H/L) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 0.04 \cdot [(D_H/L) \cdot Re \cdot Pr]^{\frac{2}{3}}}$$

Modellalkotás

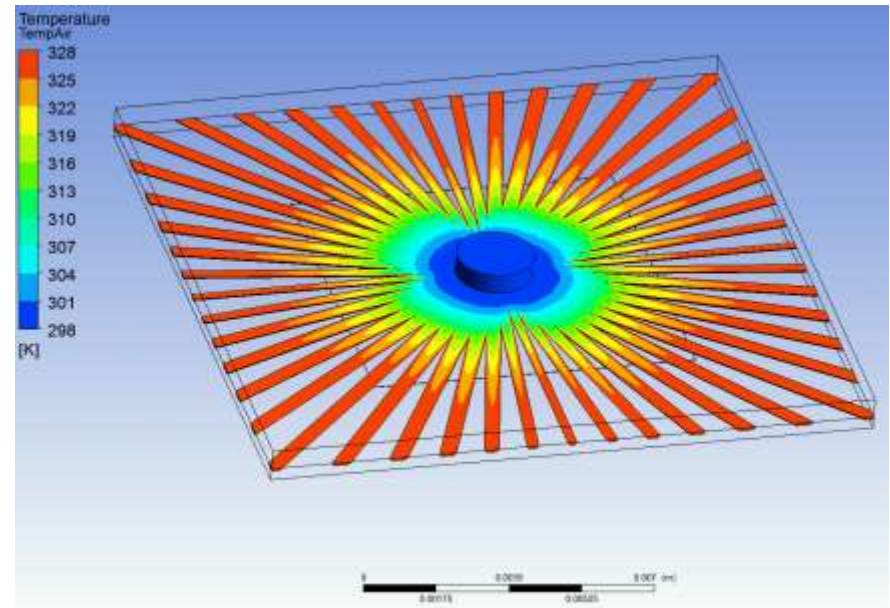
- ▶ Hőátadás szempontjából „hasznos szakasz” meghatározására a cél!

$$T_e = T_w - (T_w - T_i) \left(e^{-\frac{h \cdot p \cdot L}{\frac{dm}{dt} \cdot c_p}} \right)$$

$$L_{char} = \frac{\frac{dm}{dt} c_p}{h \cdot p}$$

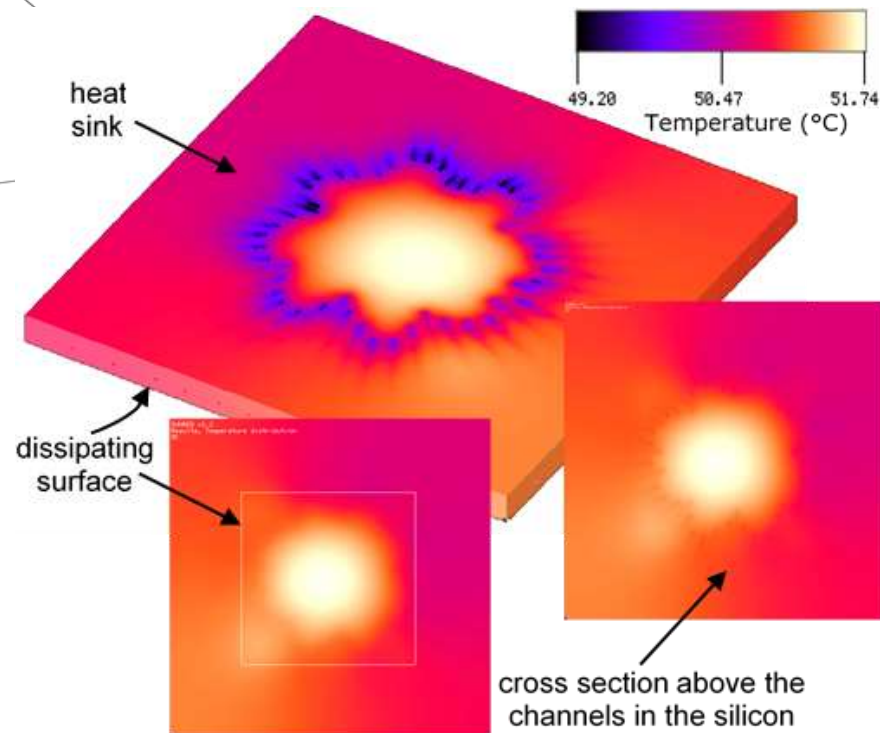
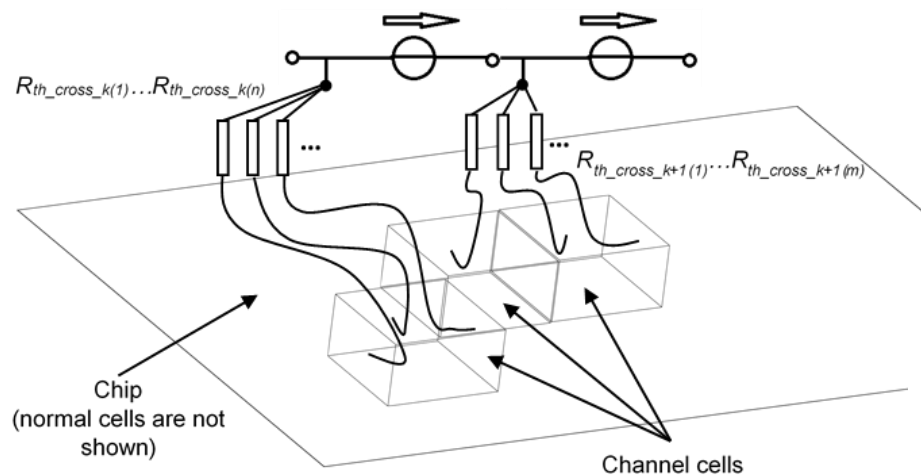
- ▶ Integrált mikroméretű csatornákat tartalmazó IC-k esetén kb. a csatorna első ötödén történik hőátadás!
- ▶ A hűtőközeg hőkapacitása és áramlási sebessége tehát meghatároz egy **maximális** elszállítható energiamennyiséget

$$Q_{max} = \frac{dm}{dt} \cdot c_p \cdot (T_w - T_i)$$



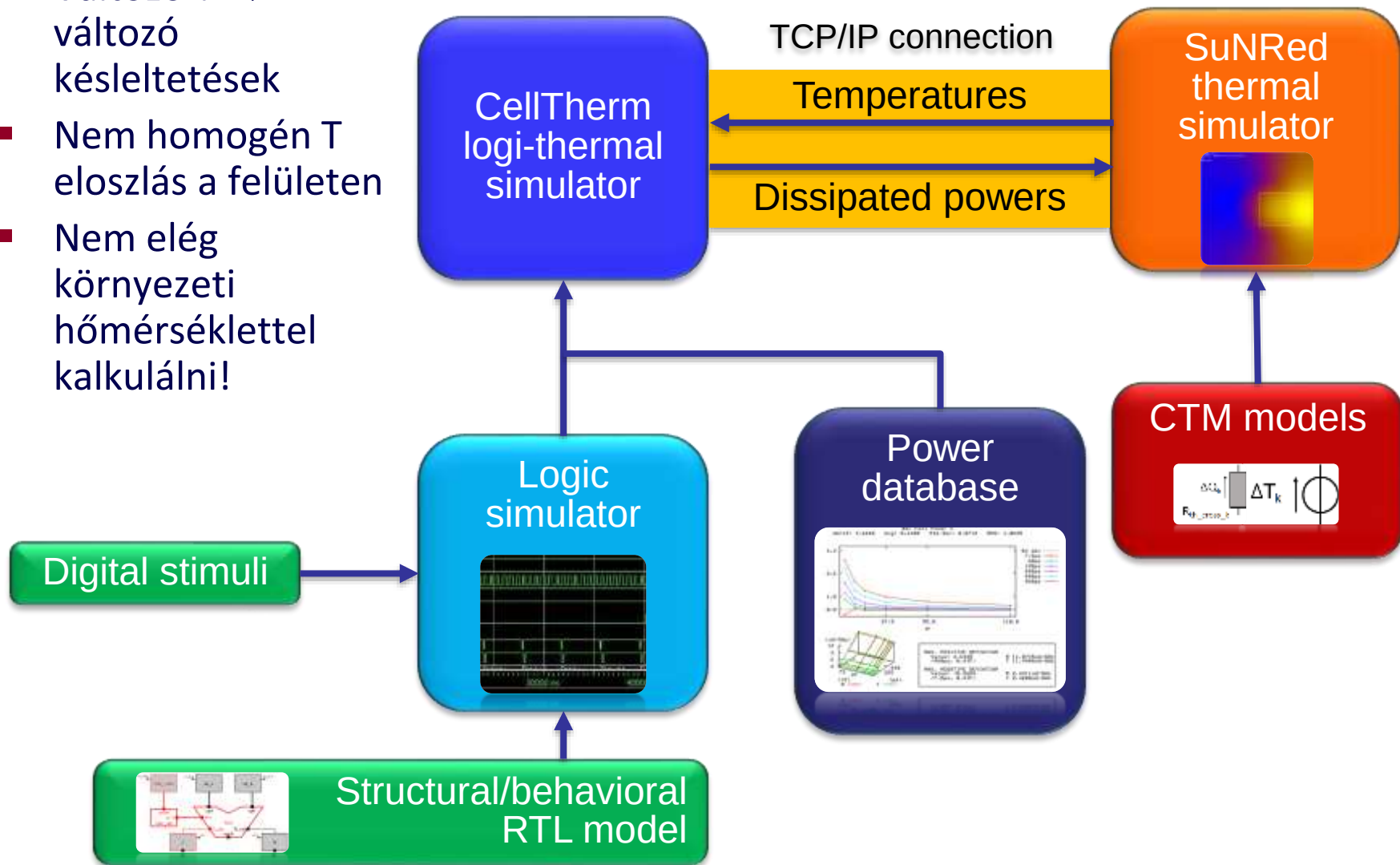
Termikus szimulációk integrált uCh

- ▶ In-house termikus szimulátor kiegészítve ún. csatorna cellákkal
- ▶ Cellák oldalfalain, mint peremfeltétel beállítva hőellenállás



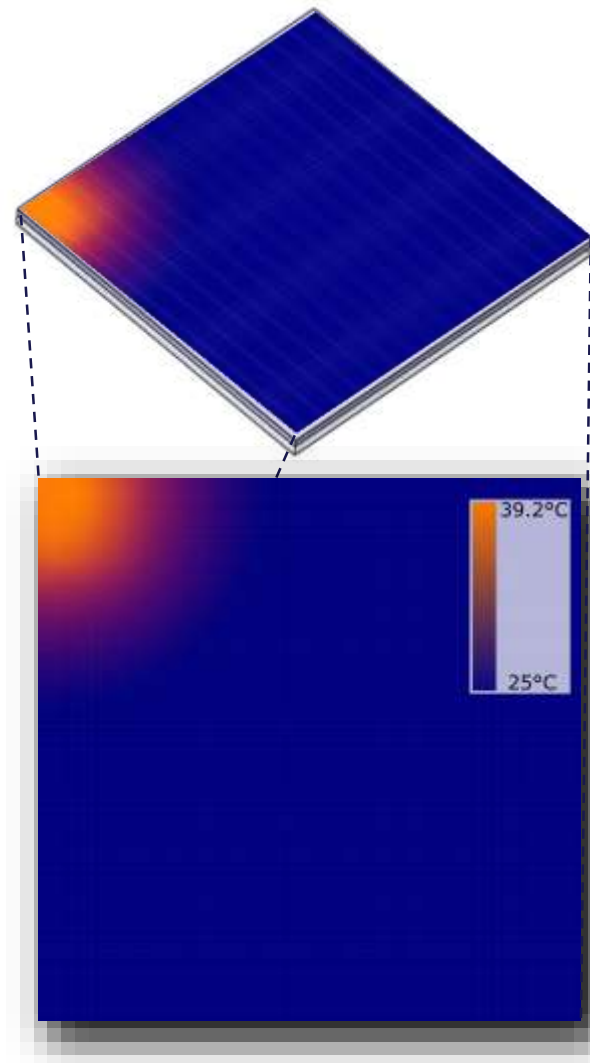
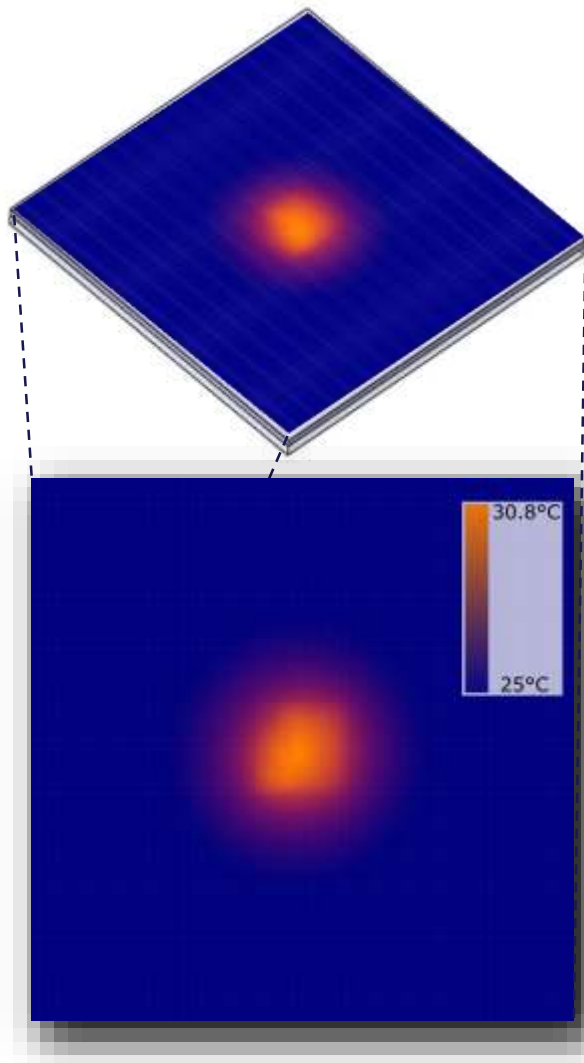
Logitermikus szimulációk integrált uCh

- Változó $T \rightarrow$ változó késleltetések
- Nem homogén T eloszlás a felületen
- Nem elég környezeti hőmérséklettel kalkulálni!



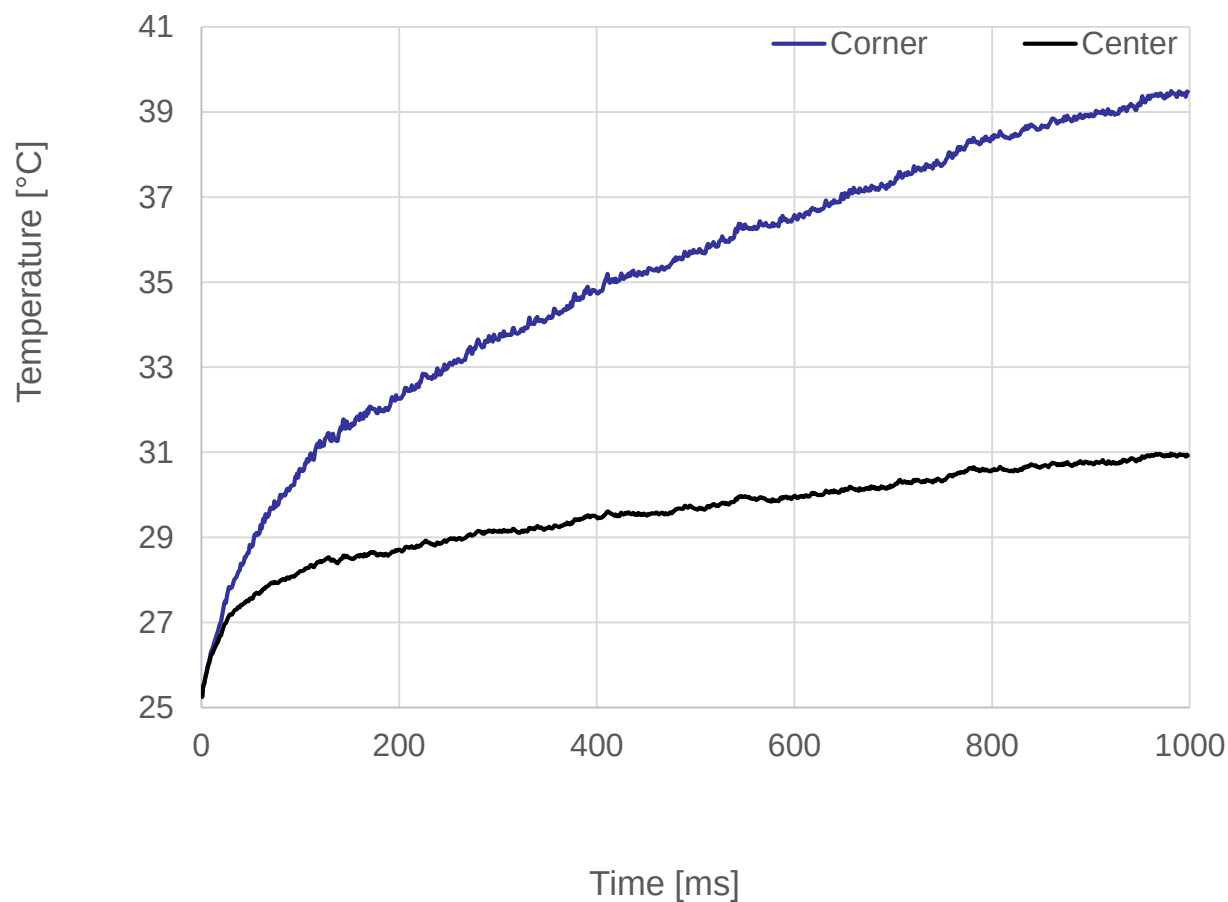
Logitermikus szimulációk integrált uCh

► DC szimulációs eredmény



Logitermikus szimulációk integrált uCh

► Tranziens szimulációs eredmény

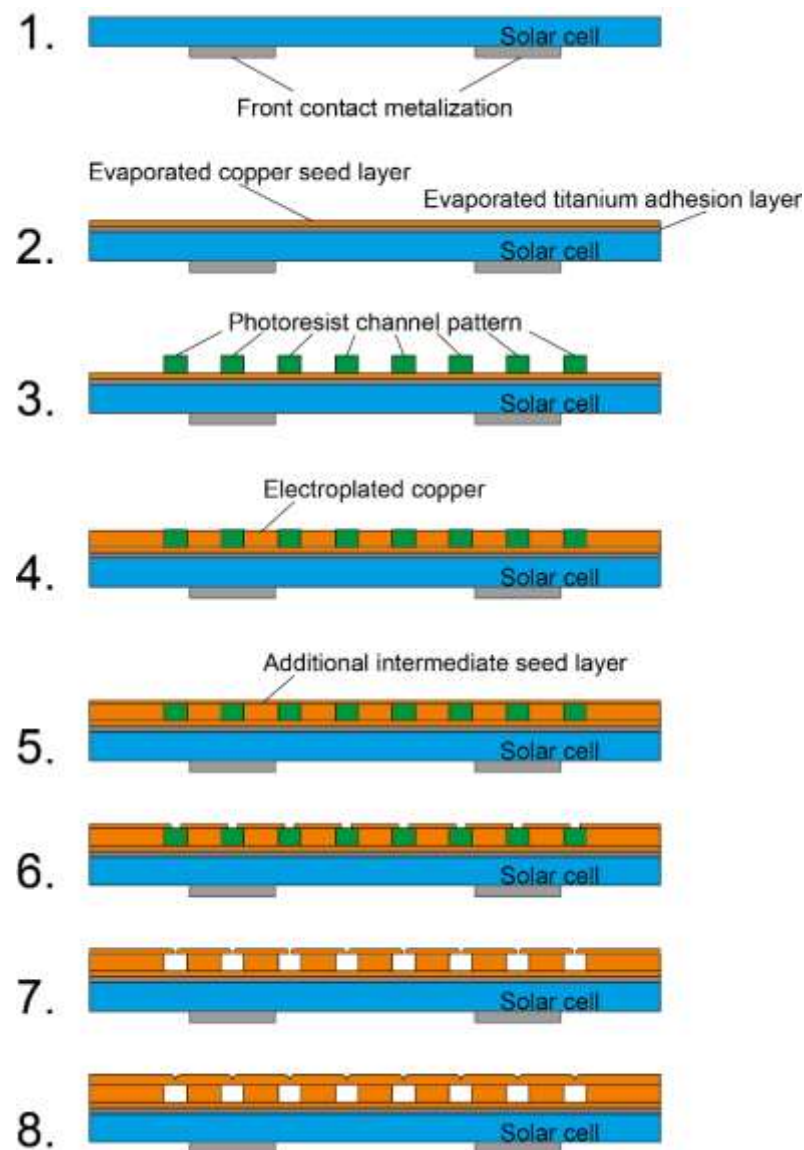
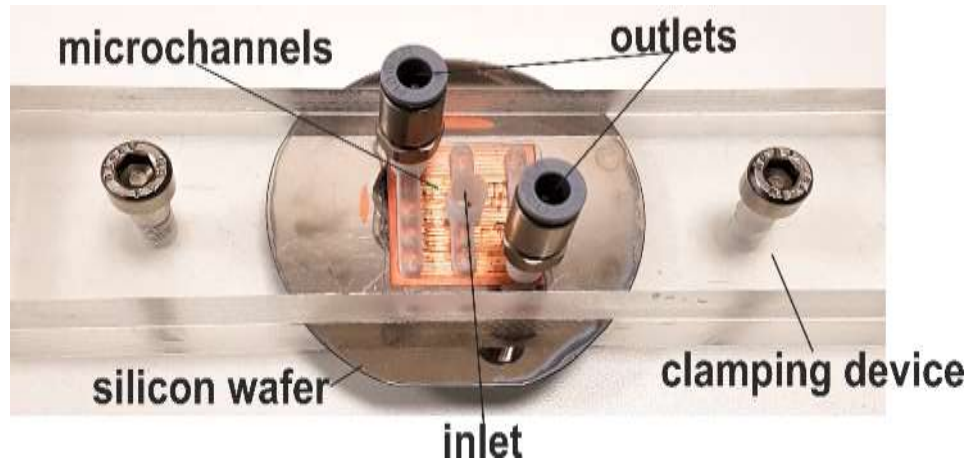


AKTUÁLIS KUTATÁSOK ÉS JÖVŐBELI TERVEK KONCENTRÁLT NAPELEM MODULOK



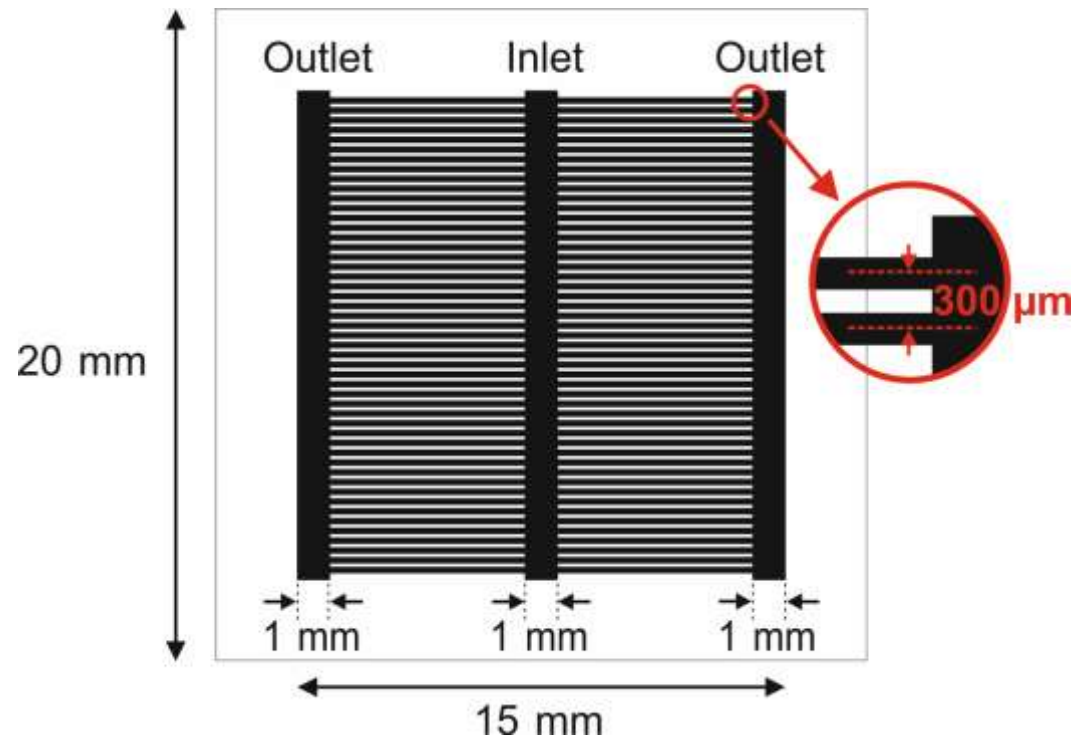
CPV csatorna kialakítás technológia

- ▶ Hátoldali kontaktus galvanizálása során alakítunk ki mikroméretű csatornákat
- ▶ Nem kerül TIM a hátoldalra a CPV és hűtőborda közé!



CPV csatorna geometria

- ▶ Egymással párhuzamosan kötött azonos hőellenállású csatornaszakaszokkal kialakított elrendezésben az eredő hőellenállás töredékére csökken.
- ▶ 6 mm csatornahossz mellett a hűtőközeg hőmérséklete a kiömlő nyílásnál éri el majdnem a fal hőmérsékletét
- ▶ Csatorna szélesség 50...200 μm között változtatható, mint szabad paraméter.
- ▶ Végső struktúra:
 - 70 μm mélység
 - 200 μm szélesség



Analitikus eredmények

- ▶ 25°C hőmérsékletű, víz hűtőközeg használata esetén, 100kPa nyomáskülönbség mellett, 200 μm csatornaszélesség esetén az elérhető minimális hőellenállás **0,26 K/W**
- ▶ $R_{\text{TH_ja}}=0,26 \text{ K/W}$, akkor 25% hatásfokú napelem cellát feltételezve, 100 $\times$ koncentráció esetén a napelem hőmérséklete csak **7,8°C hőmérséklettel emelkedik!**

Csatornák száma	Csatorna hossza (mm)	Csatorna magassága (μm)	Csatorna szélessége (μm)	Áramlási sebesség (l/h)	Hőellenállás (K/W)
50	6	50	50	0.66	1.38
50	6	50	100	2.14	0.56
50	6	50	200	5.26	0.26

Analitikus eredmények

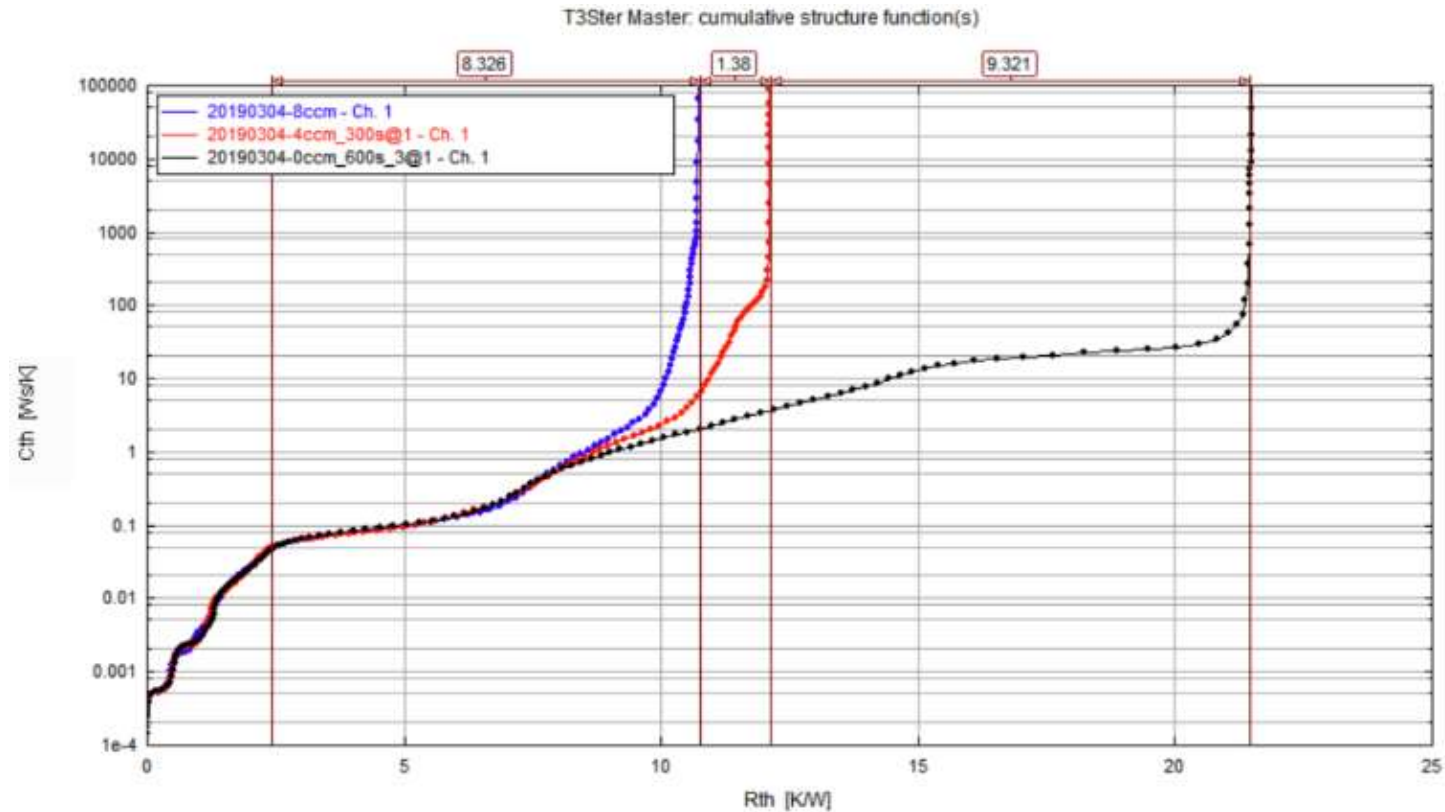
- ▶ 60°C hőmérsékletű, 20 mm × 15 mm napelem cella esetén maximálisan **134 W** hőteljesítmény szállítható el (1 bar nyomásesés mellett).

@50, 0.006, 50e-6, 200e-6, 200e-6, 0.000001, 25C, water

0.5 bar	-	2.63 l/h	-	0.3929 [K/W]	-	89.0806 [W]	
1.0 bar	-	5.26 l/h	-	0.2611 [K/W]	-	134.0519 [W]	
1.5 bar	-	7.89 l/h	-	0.2148 [K/W]	-	162.9666 [W]	
2.0 bar	-	10.52 l/h	-	0.1890 [K/W]	-	185.1395 [W]	REYNOLDS 465
3.0 bar	-	15.78 l/h	-	0.1593 [K/W]	-	219.7606 [W]	REYNOLDS 698
5.0 bar	-	21.04 l/h	-	0.1414 [K/W]	-	247.4461 [W]	REYNOLDS 931

Mérési eredmények

► Termikus tranziens tesztelés

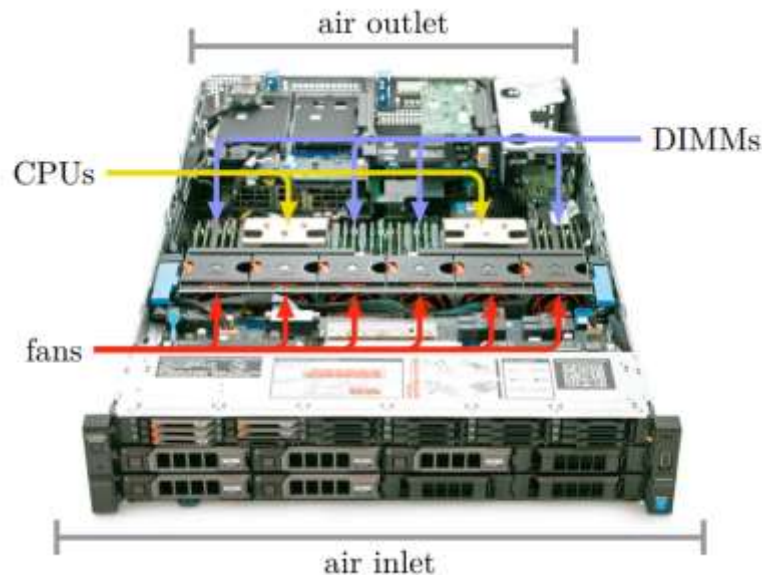


AKTUÁLIS KUTATÁSOK ÉS JÖVŐBELI TERVEK ADATKÖZPONTOK TERMIKUS MENEDZSMENTJE



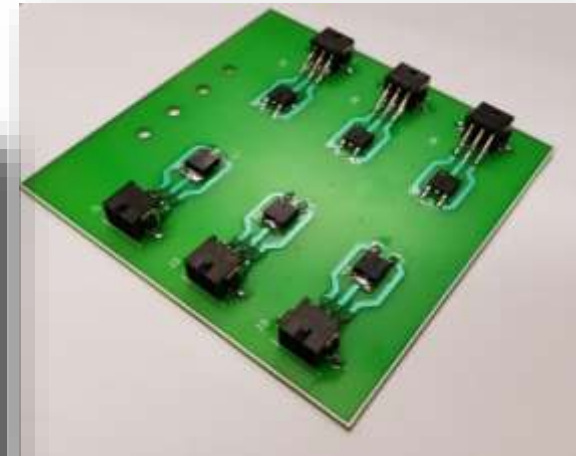
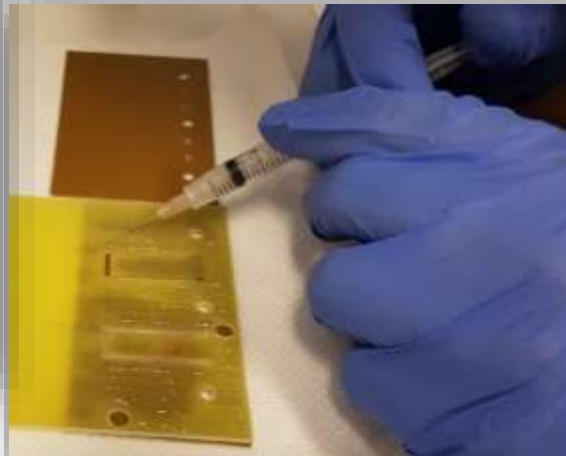
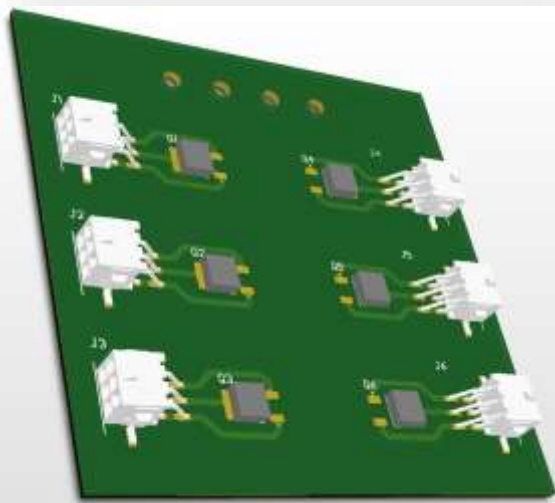
Motiváció

- ▶ Adatközpontokban kiemelkedő jelentőségű a hatékony hűtés megoldása.
- ▶ Hűtési hatékonyság növelése, nem járhat együtt a működési költségek jelentős növekedésével.
- ▶ Folyadékhűtésű vagy teljesen új elvű rendszerre áttérés költséges, a teljes data center újjáépítését igényli.
- ▶ Léghűtésnél árnyékoló hatás, vízhűtésnél csak a fő disszipáló elemek hűtése valósul meg.

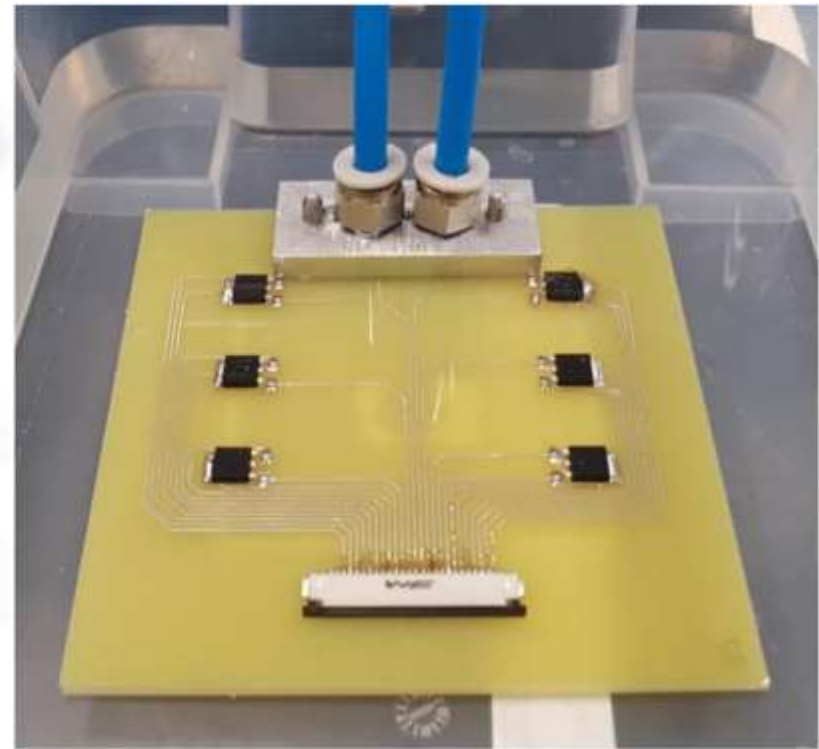
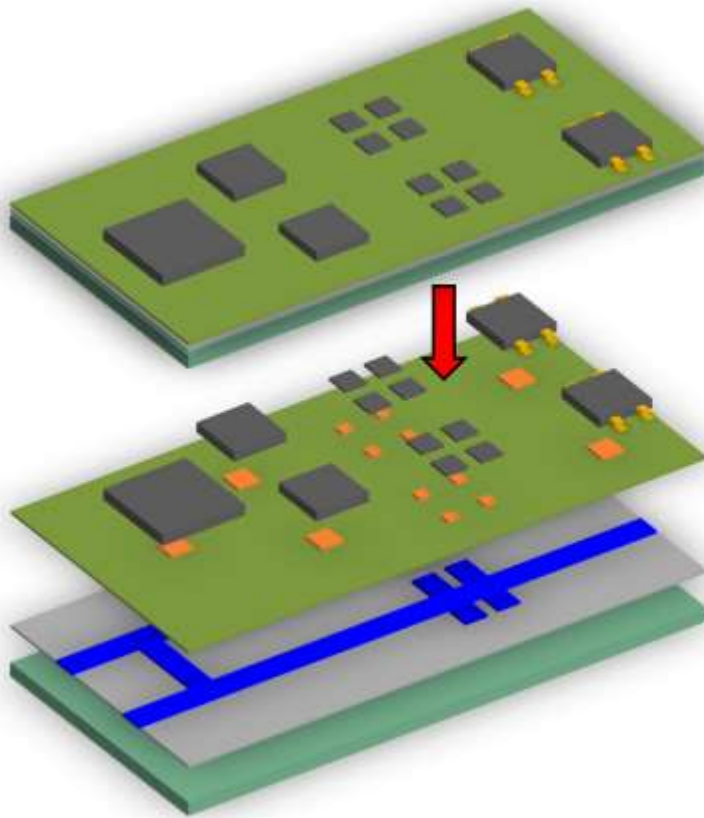


Célkitűzések

- ▶ Eltemetett csatornák kialakítási technológiájának kidolgozása
 - Az iparban elterjedten használt FR4 technológiára épülő hűtési módszer kifejlesztése
 - Gyártósorba illeszthető post-process eljárás kidolgozása
- ▶ Prototípus tesztáramkörök tervezése és legyártatása
- ▶ Karakterizáló mérések a prototípus mintákon
- ▶ Mérési eredmények validálása szimulációval

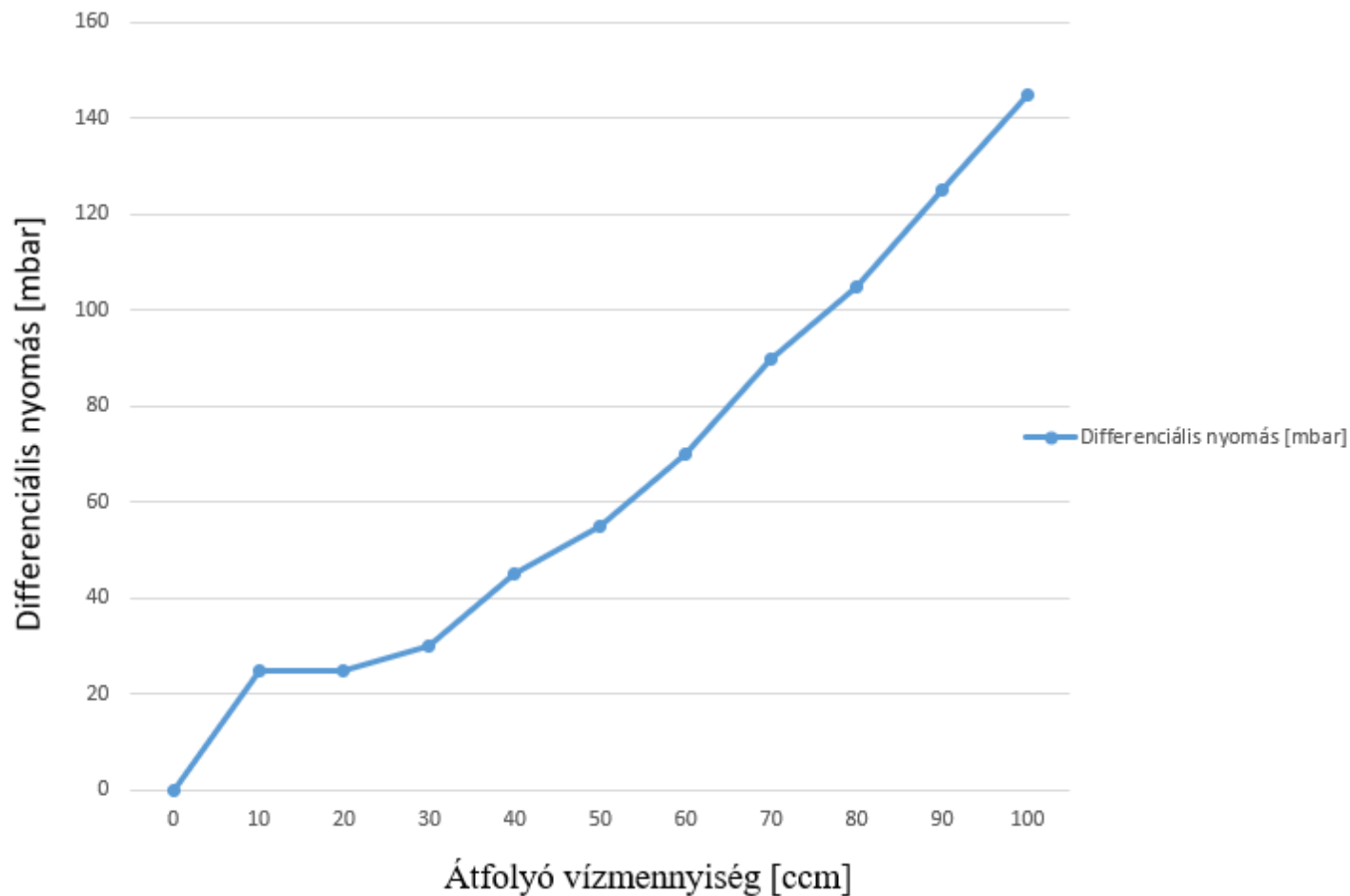


Eltemetett csatornák áramköri hordozókban



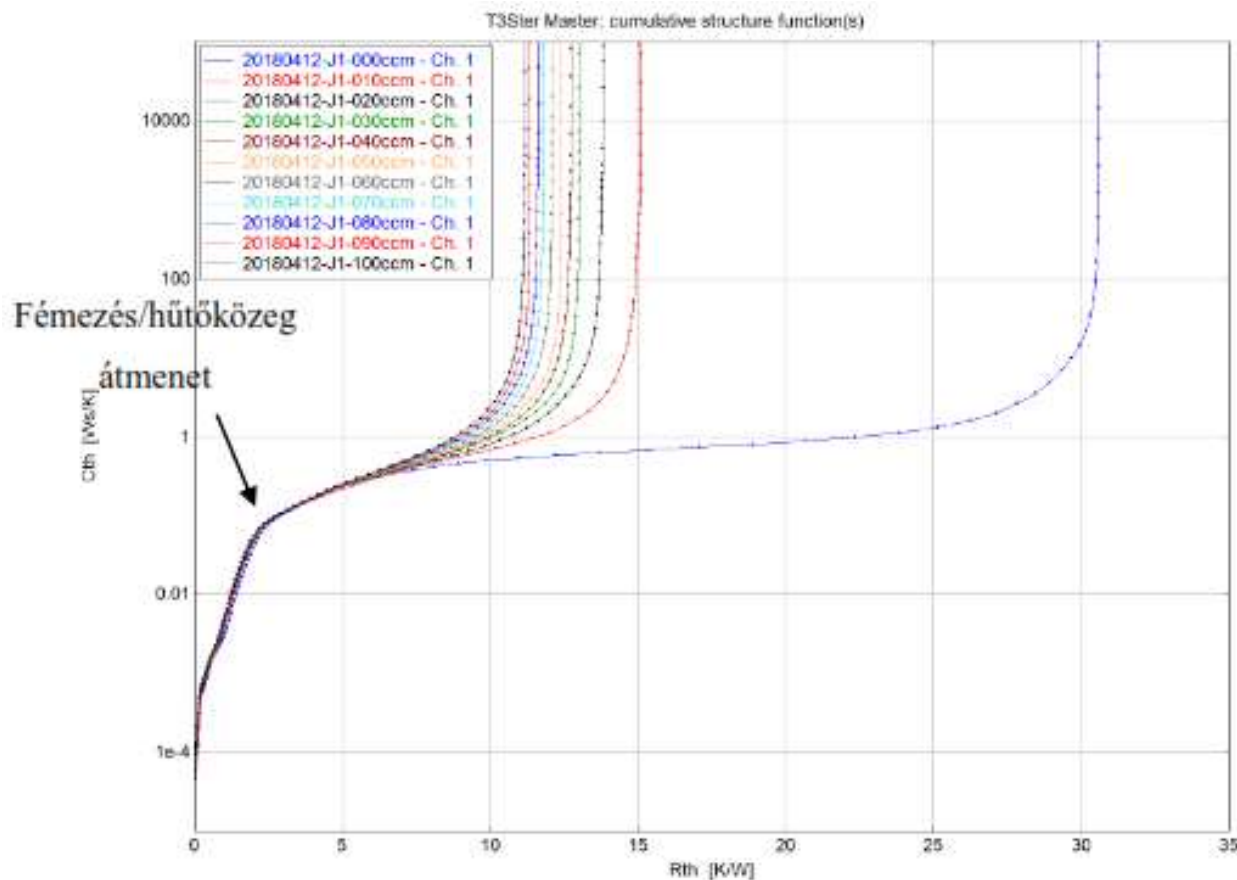
Karakterizáló mérések

► Differenciális nyomásmérés



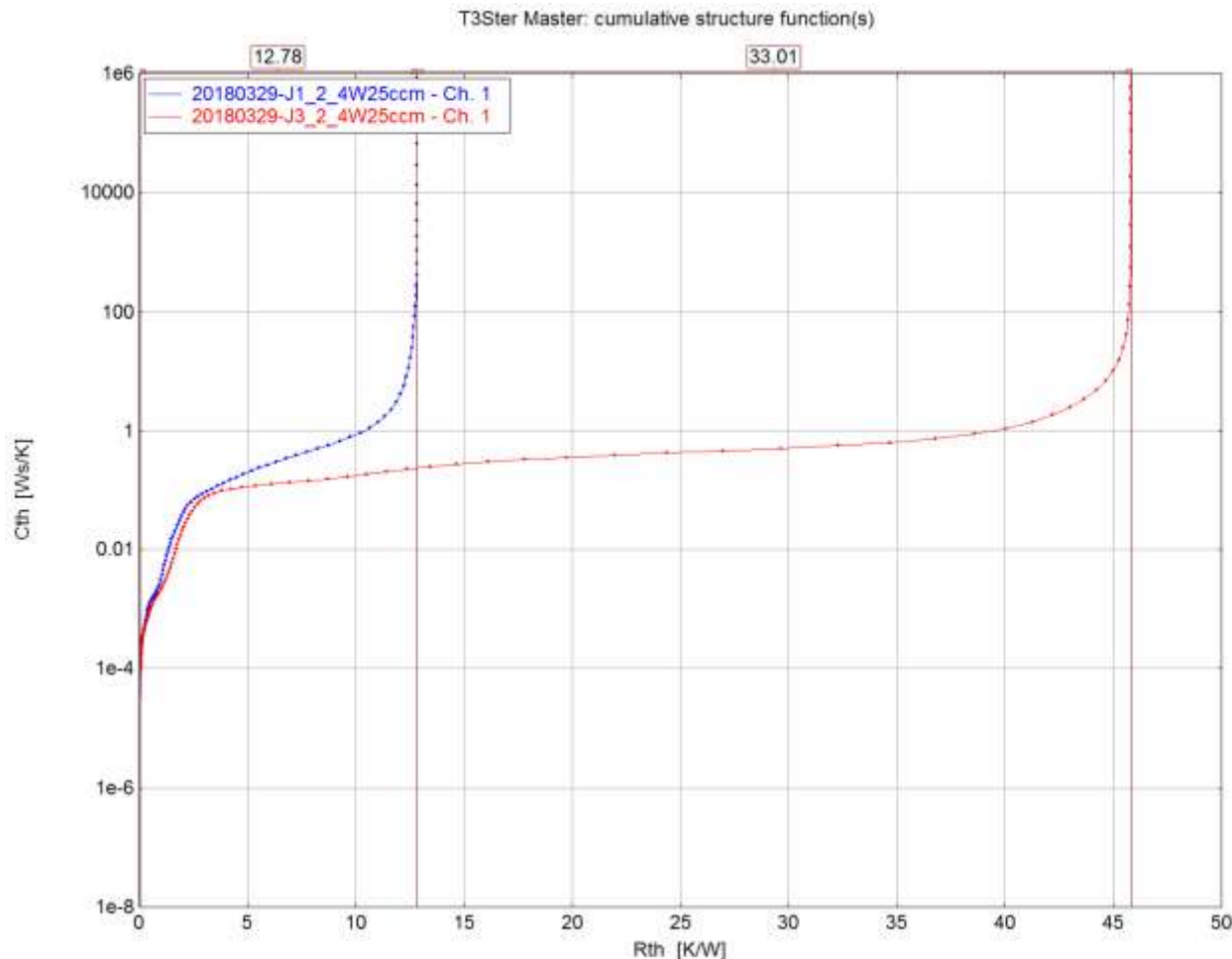
Karakterizáló mérések

- Termikus tranziens mérés → kumulatív struktúra függvény
 - Termikus VIA alkalmazásával



Karakterizáló mérések

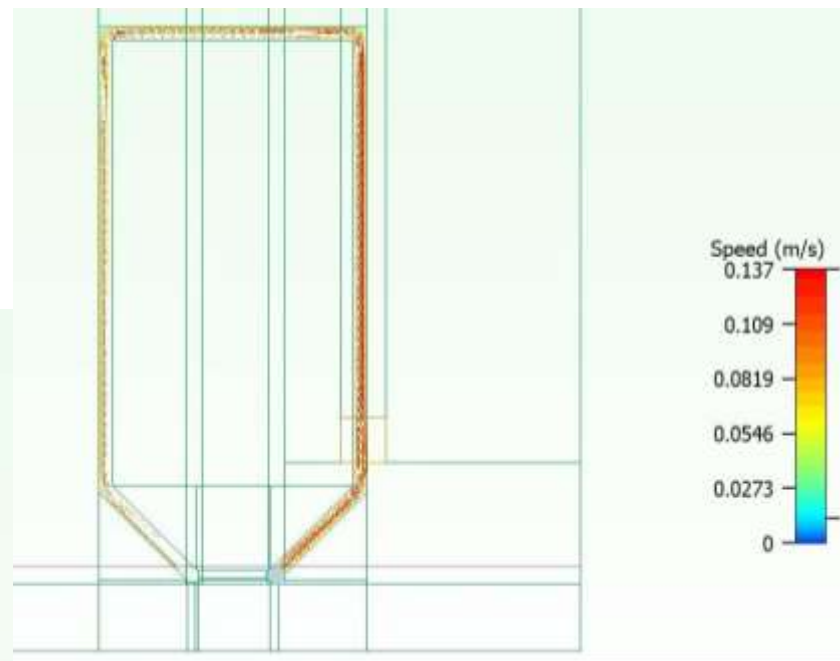
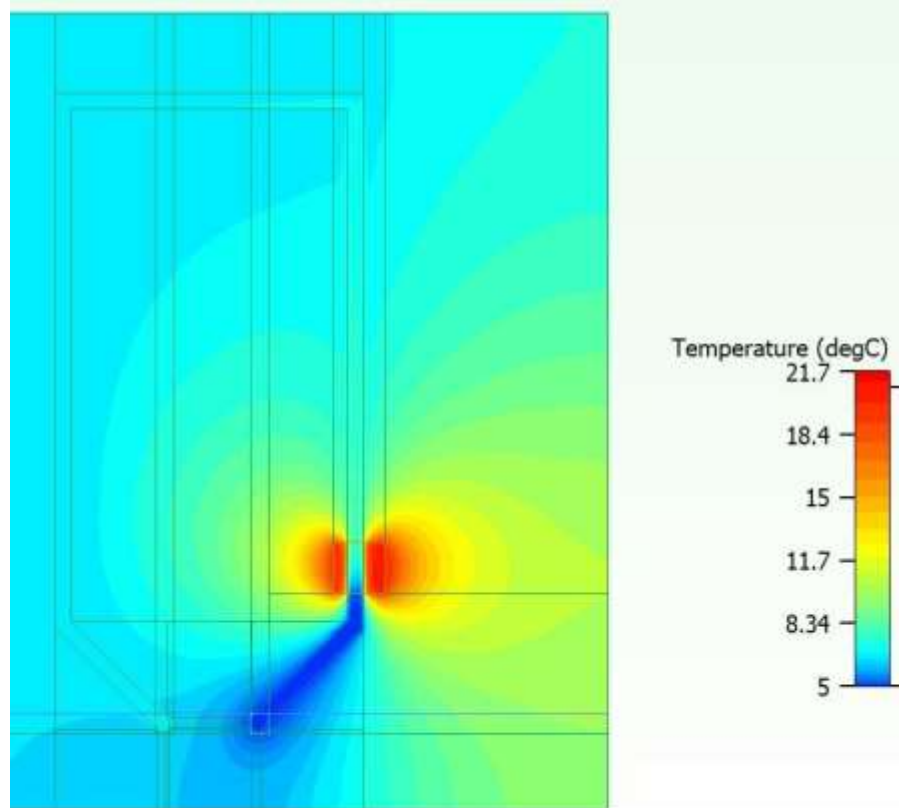
- ▶ Termikus tranziens mérés → kumulatív struktúra függvény
 - Termikus VIA nélkül vs. Termikus VIA alkalmazásával



Validálás szimulációval

A tranzisztor és az áramló
közeg közötti hőellenállás:

16,7 K/W



Szimuláció alapján a parciális
hőellenállás értéke: **16,2 K/W**

CFD szimuláció: FloTHERM 12.1

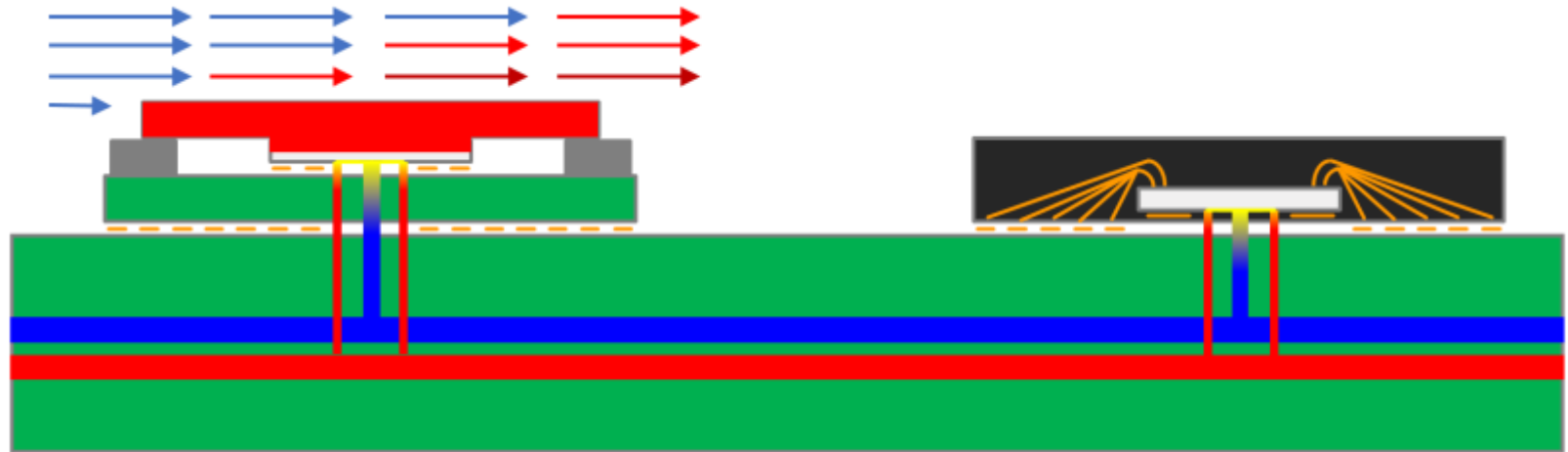
Minden oldalon adiabatikus peremfeltétel

Hővezető viák réztömbként reprezentálva

Átáramló víz paraméterei: 5°C, 10 ccm

Jövőbeli tervek

- ▶ Elő és hátoldali szereléshez is kialakítani a technológiát
- ▶ Furatszerelt és Fan-out BGA-s áramkörök hűtése
- ▶ Chip szintű hűtés integrálása
- ▶ Kombinált hűtés megvalósítása rack eszközökben



Köszönetnyilvánítás

- ▶ OTKA 109232 Kutatás résztvevőinek
 - Dr. Takács Gábor és Dr. Szabó Péter Gábor
 - Dr. Plesz Balázs, Dr. Pohl László, Rózsás Gábor
 - Dr. Földváry-Bándy Enikő, Straszner András,
 - Jani Lázár, Dr. Timár András, Kohári Zsolt
- ▶ Dr. Poppe András, Dr. Rencz Márta
- ▶ Elektronikus Eszközök Tanszéke munkatársainak
- ▶ Érdeklődő, lelkes, tehetséges hallgatóknak

Köszönöm a figyelmet!

