



6-01 ELEKTRONIKUS KÉSZÜLÉKEK TERMÍKUS KONSTRUKCIÓJA

ELEKTRONIKAI TECHNOLÓGIA

VIETA302

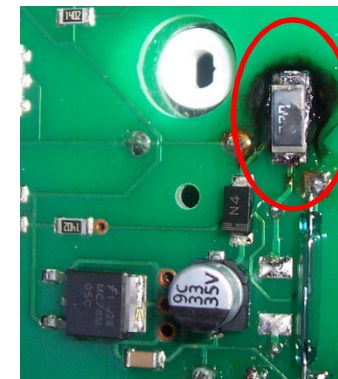
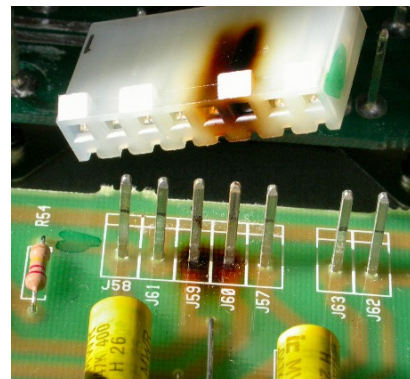
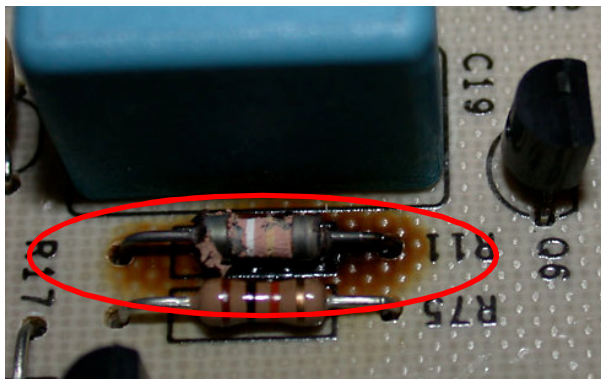
WE CONNECT CHIPS AND SYSTEMS



BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS
DEPARTMENT OF ELECTRONICS TECHNOLOGY

A TERMIKUS KONSTRUKCIÓ SZÜKSÉGESSÉGE

- Az elektromos alkatrészekben működésük során hő keletkezik,
- a készülékeket kívülről különböző hőhatások érhetik,
- a hő és a hőmérséklet változása káros hatásokat gyakorolhat az elektromos készülékek működésére.



AZ ESZKÖZÖKBEN DISSZIPÁLÓDÓ TELJESÍTMÉNY

- Ellenállás, vezetékek: $P = \frac{1}{t} \cdot \int U(t) \cdot I(t) dt$
- Kapacitás: $P(t) = \pi \cdot f \cdot C \cdot U^2 \cdot \sin(4 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$
- Induktivitás: $P(t) = \pi \cdot f \cdot L \cdot I^2 \cdot \sin(4 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$
- MOSFET:

- bekapcsolt állapotban: $P = I_D^2 \cdot R_{DS(ON)}$

- kapcsolóüzemben:

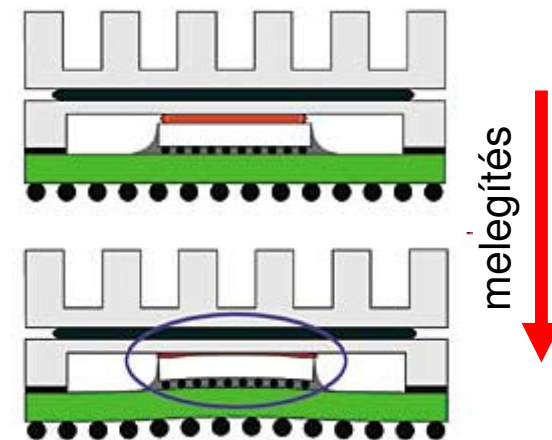
$$P = f_s \cdot \left(\int_0^{ts1} U_{DS}(t) I_D(t) dt + \int_0^{ts2} U_{DS}(t) I_D(t) dt \right)$$

(t_{s1} , t_{s2} : kapcsolási idők, Q_G : töltés csúcsértéke a Gate-en)



A HŐ ÉS A HŐMÉRSÉKLETVÁLTOZÁS HATÁSAI

- Magas hőmérséklet:
 - anyagok termikus és vegyi bomlása,
 - diffúzió felgyorsul,
 - lágyulás,
 - polimerek öregedése,
 - villamos paraméterek változása.
- Hőmérséklet változása:
 - anyagok hőtágulásának illesztlenségéből származó mechanikai feszültség léphet fel.



HŐVEZETÉS (KONDUKCIÓ)

A hőenergia terjedése a szilárdtestekben a helyhez kötött részecskék közötti kinetikus energiaátadással és a szabad részecskék diffúziójával valósul meg.

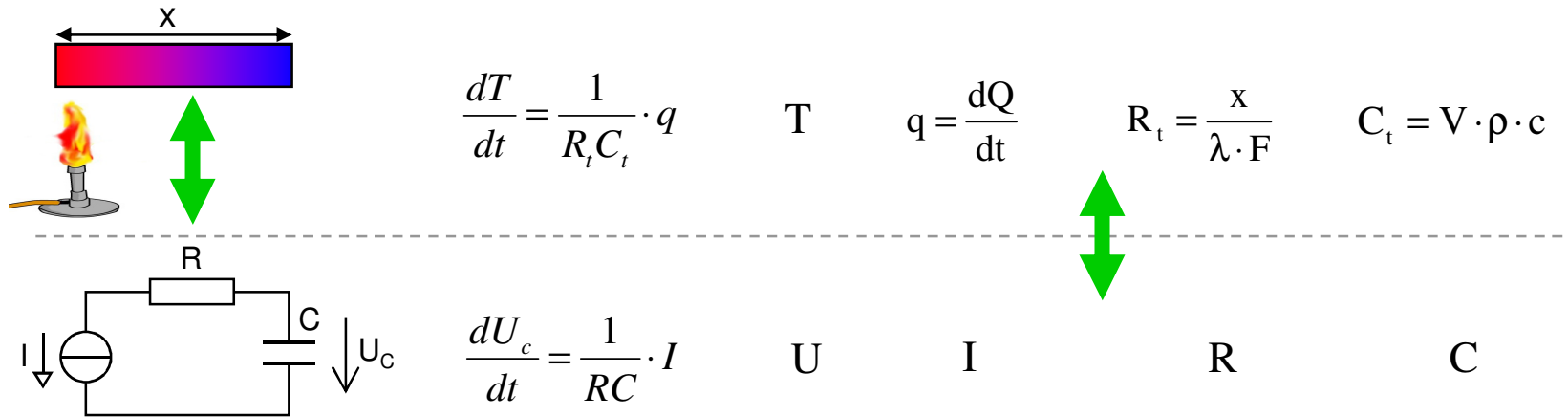
Matematikai leírása: Fourier-törvény (1822): $\frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot F \cdot \frac{dT}{dx}$

ahol dQ/dt a hőáram, λ a hővezetési tényező, F a felület, dT/dx a hőmérsékleti gradiens.

A hővezetés általános egyenlete:

$$\left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t}$$

A feladatok megoldását gyakran villamos analógia segítségével végezzük:



HŐSZÁLLÍTÁS (KONVEKCIÓ)

A hőenergia terjedése gázokban és folyadékokban a közeget alkotó részecskék rendezett elmozdulásával (áramlás) valósul meg, de szerepet játszhat a részecskék közötti molekuláris szintű hővezetés és sugárzás is.

Matematikai leírása:
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\rho c}{\lambda} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

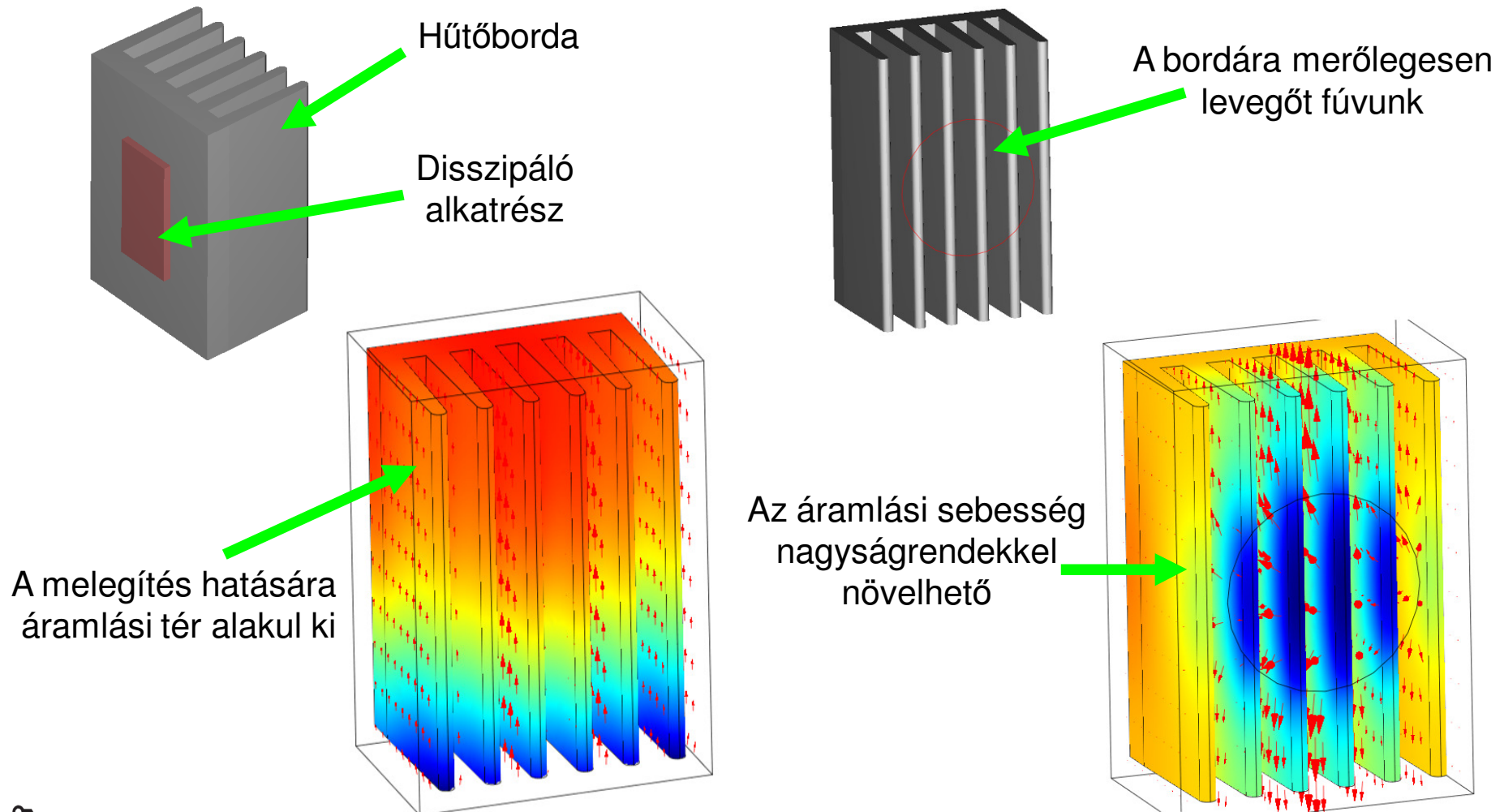
(a sugárzás elhanyagolásával, ha az áramló közegben csak hővezetés, és a tömegáramból adódó hőáramlás van), ahol w_x , w_y , w_z a közeg sebességösszetevői, melyek a Navier-Stokes egyenlet segítségével határozhatók meg.

A közegben a sebességtér kialakulása lehet:

- természetes (az anyagok sűrűsége hőmérsékletfüggő, ezért melegítés hatására áramlás alakul ki),
- mesterséges (a gáz vagy folyadék mesterséges áramoltatása).

HŐSZÁLLÍTÁS (KONVEKCIÓ)

Természetes és mesterséges konvekció összehasonlítása:



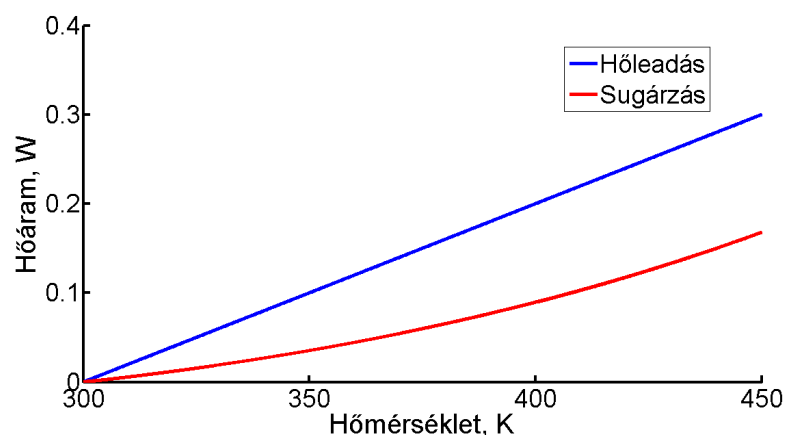
HŐSUGÁRZÁS

Az energia térbeli terjedésének elektromágneses hullámok formájában megvalósuló folyamata.

Matematikai leírása: Stefan-Boltzmann törvény (1879): $\frac{dQ}{dt} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot F \cdot (T_{sz}^4 - T_k^4)$

(csak ún. szürke testekre érvényes!) ahol dQ/dt a hőáram, ε az emissziós tényező, σ_0 a Stefan-Boltzmann állandó ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), F a felület, T_{sz} a szilárd test hőmérséklete, T_k a környezet hőmérséklete.

A sugárzásból származó hőáram mértéke:



Felület mérete: 1 cm^2 ,

$T_f = T_k = 300 \text{ K}$

$\alpha = 20 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$,

$\varepsilon = 0,9$

HŐÁTADÁS

A hőátadás a szilárd testek és a folyadékok (gázok) határfelületén létrejövő hőterjedés, melyben a vezetés, a szállítás és a sugárzás is szerepet játszik.

Matematikai leírása: Newton-szabály (1701): $\frac{dQ}{dt} = \alpha \cdot F \cdot (T_{sz} - T_f)$

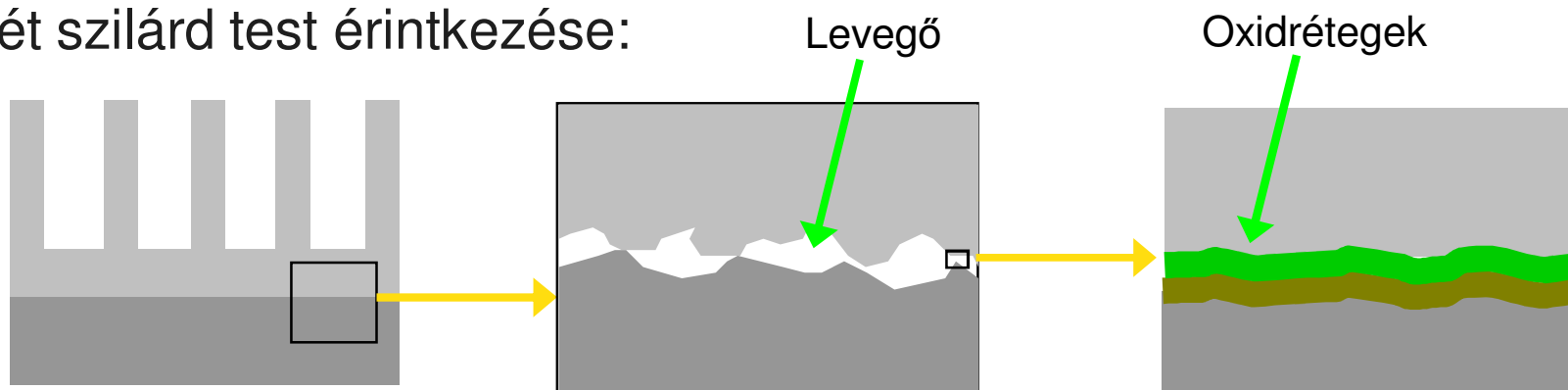
ahol dQ/dt a hőáram, F a felület, T_{sz} a szilárd test hőmérséklete, T_f a folyadék (gáz) hőmérséklete, α az ún. hőleadási tényező.

A hőleadási tényező függ:

- a test hővezető képességétől,
- a test felületének minőségétől,
- a folyadék/gáz minőségétől,
- a folyadék/gáz fizikai tulajdonságaitól
(hőmérséklet, nyomás, áramlási sebesség,
áramlás típusa...).

HŐÁTADÁS SPECIÁLIS ESETE

Két szilárd test érintkezése:



Az átmenetben mindhárom vezetési forma jelen van:

- vezetés (gyakran a szilárd test oxidjainak, vegyületeinek vezetése),
- hőátadás-szállítás,
- sugárzás.

Az átmenet igen nagy termikus ellenállást jelenthet, amely csökkenthető:

- a felületek polírozásával, és egymáshoz nyomásával,
- a felületek összepréselésével,
- a felületek egymáshoz való forrasztásával,
- a felületek közé helyezett ún. termikus interfész alkalmazásával.

TERMIKUS INTERFÉSZ MEGOLDÁSOK

Termikus interfész anyagok:

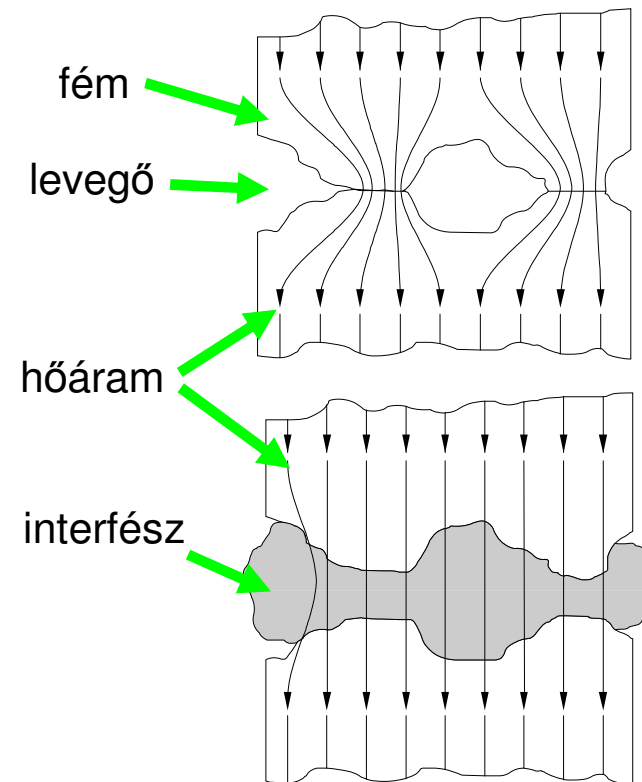
- rugalmasságuknak/viszkozitásuknak köszönhetően kitöltik a réseket,
- viszonylag nagy hővezető képességgel rendelkeznek (levegőhöz képest),
- reaktív komponenseik segítségével a felületek minőségét javíthatják.

Alkalmazásuk szempontjai:

- hővezető képesség,
- elektromos vezetőképesség,
- rugalmassági/területi jellemzők,
- hosszútávú stabilitás és megbízhatóság,
- kezelhetőség.

Megvalósítás:

- hővezető paszta,
- hővezető ragasztó,
- hővezető alátét,
- halmazállapotváltó anyagok.



TERMIKUS INTERFÉSZ MEGOLDÁSOK

Hővezető paszta:

- leggyakrabban (oxidált) fémpehely szuszpenziója,
- a felületeket összeszorítva kell tartani,
- alkalmazása körülményes.

Hővezető ragasztó:

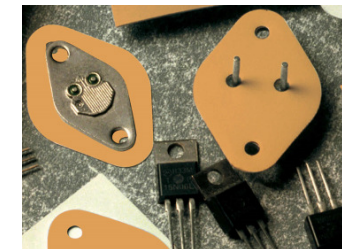
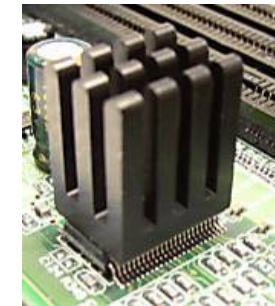
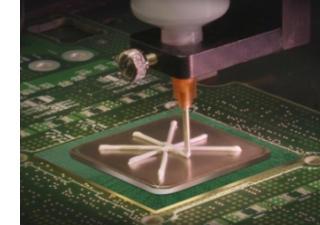
- leggyakrabban kerámia por, UV-ra, illetve hőre keményedő szuszpenzióban,
- kikeményítés után a felületeket nem kell összeszorítva tartani,
- elektromosan vezető változata is elterjedt,
- hővezető képessége kisebb.

Hővezető alátét:

- leggyakrabban nagy hővezetőképességű polimerek,
- a felületeket összeszorítva kell tartani,
- a réseket nem töltik ki tökéletesen (kevésbé rugalmasak),
- szigetelőképességük és átütési ellenállásuk nagy.

Halmazállapotváltó anyagok:

- fémpehely vagy kerámia por szuszpenziója,
- a felületeket összeszorítva kell tartani,
- az alacsony olvadáspont miatt a réseket jól kitölti,
- alkalmazása jól automatizálható.

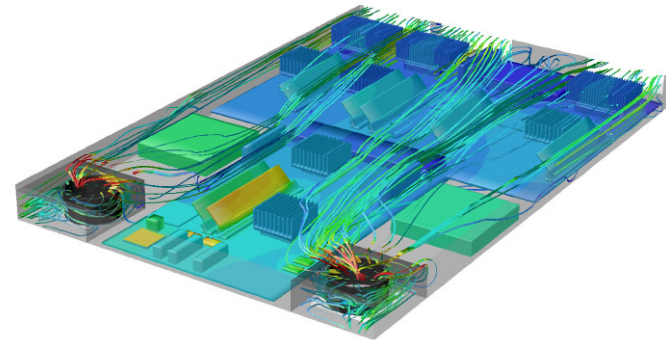


TERMIKUS KONSTRUKCIÓ

Az eszközökben keletkező hő külvilágba való elvezetését a készülék (megfelelő) termikus konstrukciója biztosítja.

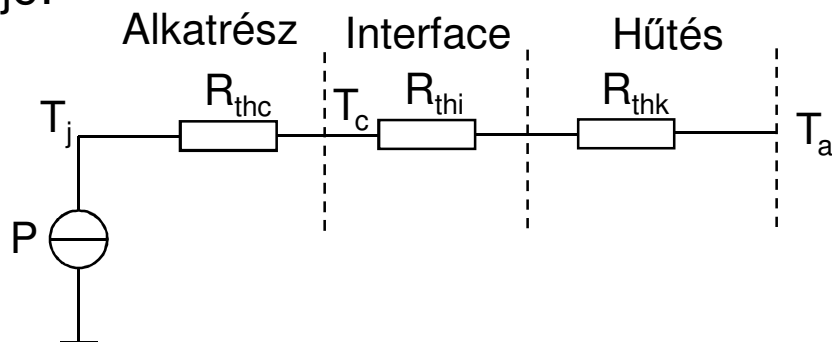
A tervezés két lépcsője:

- alkatrész szintű hűtés:
 - meghatározott sarokszámok alapján történik (maghőmérséklet, teljesítmény),
 - viszonylag egyszerű számítások,
 - nem minden alkatrész esetén szükséges,
- készülék szintű hűtés:
 - nem feltétlenül egyértelmű sarokszámok,
 - jellemzően bonyolult számítások sorozata,
- (több részegység esetén részegységenként is kell tervezni).



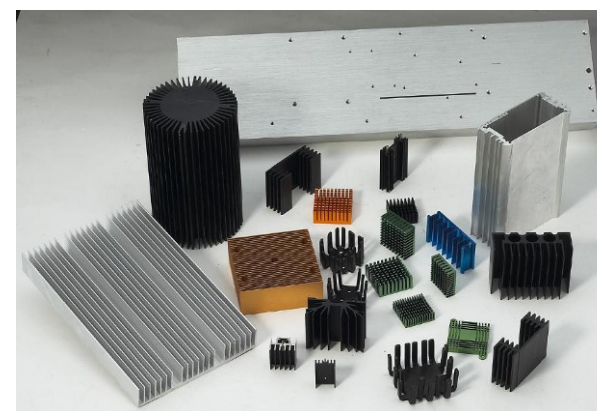
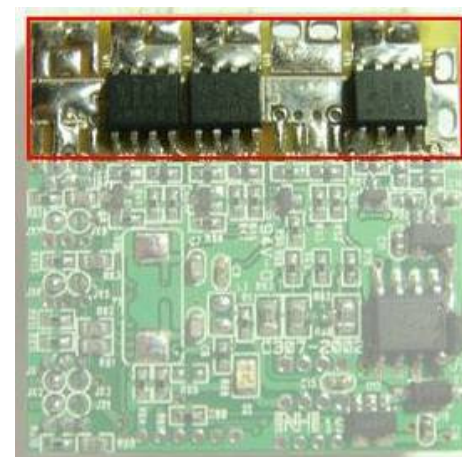
ALKATRÉSZ SZINTŰ HŰTÉS TERVEZÉSE

Az alkatrész és hűtésének villamos analógiára épülő modellje:



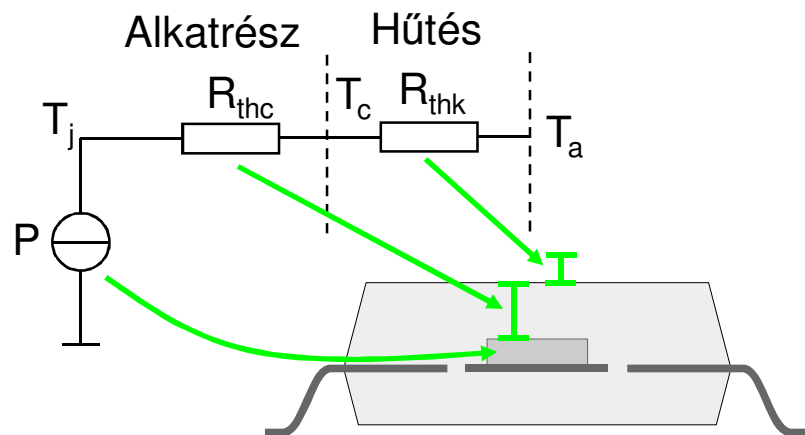
P : a félvezető által termelt hőmennyiség, W,
 T_j : a félvezető réteghőmérséklete, °C (katalógusadat),
 T_a : a környezeti (ambient) hőmérséklet, °C,
 T_c : a tok (case) felületének hőmérséklete, °C,
 R_{thc} : a tok belső hőellenállása, K/W (katalógusadat),
 R_{thi} : az interface hőellenállása, K/W (katalógusadat),
 R_{thk} : a hűtés hőellenállása, K/W (meghatározandó)

$$R_{thk} = \frac{T_j - T_a}{P} - R_{thc} - R_{thi} \longrightarrow \text{Hűtési megoldás kiválasztása}$$



ALKATRÉS SZINTŰ HŰTÉS TERVEZÉSE

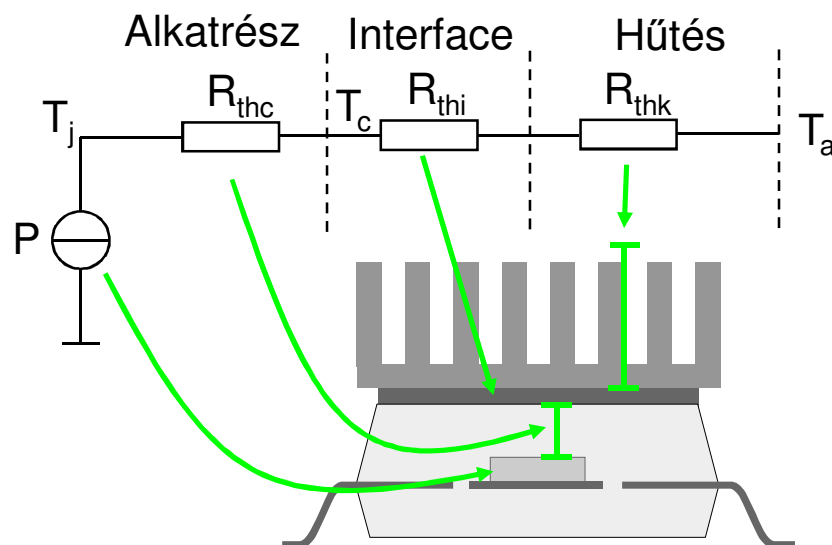
Az alkatrész hűtés „működése”:



Termikus ellenállás a félvezető felületétől a környezetig:

$$R_{th} = R_{thc} + \frac{1}{\alpha_c \cdot F_c}$$

ahol α_c az alkatrész hőleadási tényezője, F_c a tok felületének mérete.



Termikus ellenállás a félvezető felületétől a környezetig:

$$R_{th} = R_{thc} + R_{thi} + R_{thk} = \dots$$

$$\dots = R_{thc} + R_{thi} + \frac{x}{\lambda_k \cdot F_k'} + \frac{1}{\alpha_k \cdot F_k}$$

ahol x a hőáram átlagos úthossza a bordában, λ_k a borda hővezetési tényezője, F_k' az „átlagos keresztmetszet”, α_k a borda hőleadási tényezője, F_k a borda felületének mérete.

KÉSZÜLÉK SZINTŰ HŰTÉS TERVEZÉSE

A készülék szintű tervezés:

- nem feltétlenül létező elemkészlet használatára épít,
- nem tud egyértelmű megoldást adni,
- illeszkedik a készülékkonstrukció szempontjaihoz.

A feladat nehézségei: a számítások során:

- időfüggő jelenségeket is figyelembe kell venni,
- gyakran nemlinearitásokat is figyelembe kell venni,
- gyakran csatolt fizikai jelenségeket is figyelembe kell venni,
- az anyagok paraméterei reverzibilis (pl. hőmérsékletfüggés) és irreverzibilis (pl. öregedés) változásokat mutathatnak,
- a vizsgált geometria általában igen komplex,
- a határfeltételek (környezet paraméterei) nem feltétlenül rögzítettek.

KÉSZÜLÉK SZINTŰ HŰTÉS TERVEZÉSE

A tervezésnél figyelembe kell venni:

alkatrészek hatása

hűtési megoldások
hatása

szerelőlemez hatása

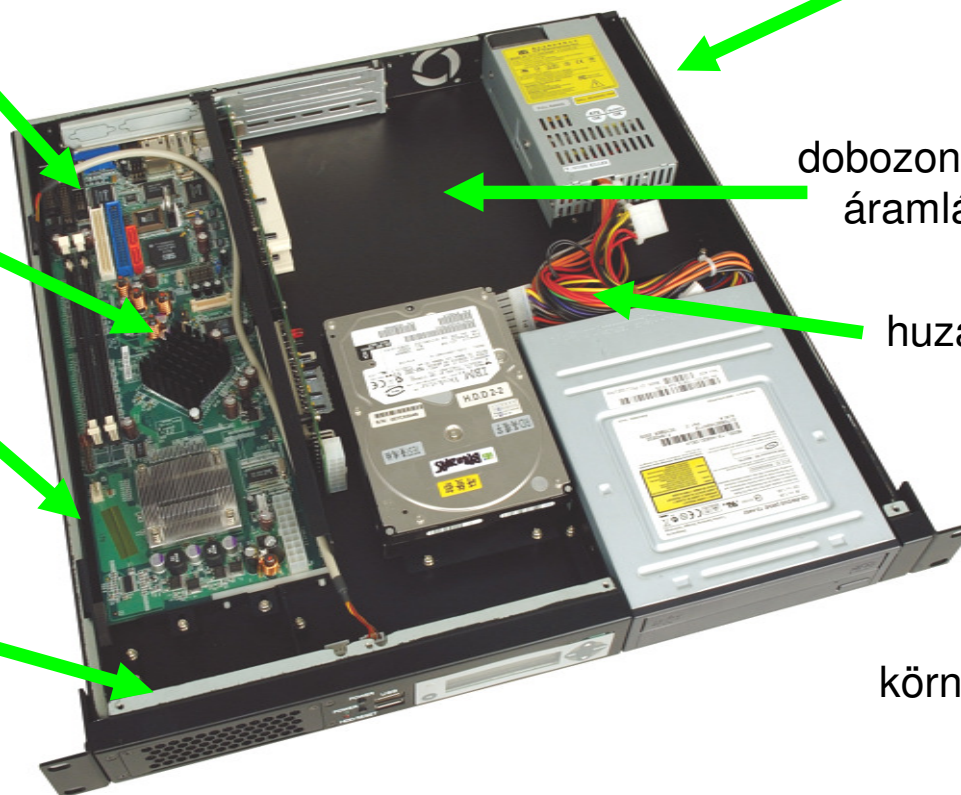
szerkezeti elemek
hatása

doboz hatása

dobozon belül kialakuló
áramlási tér hatása

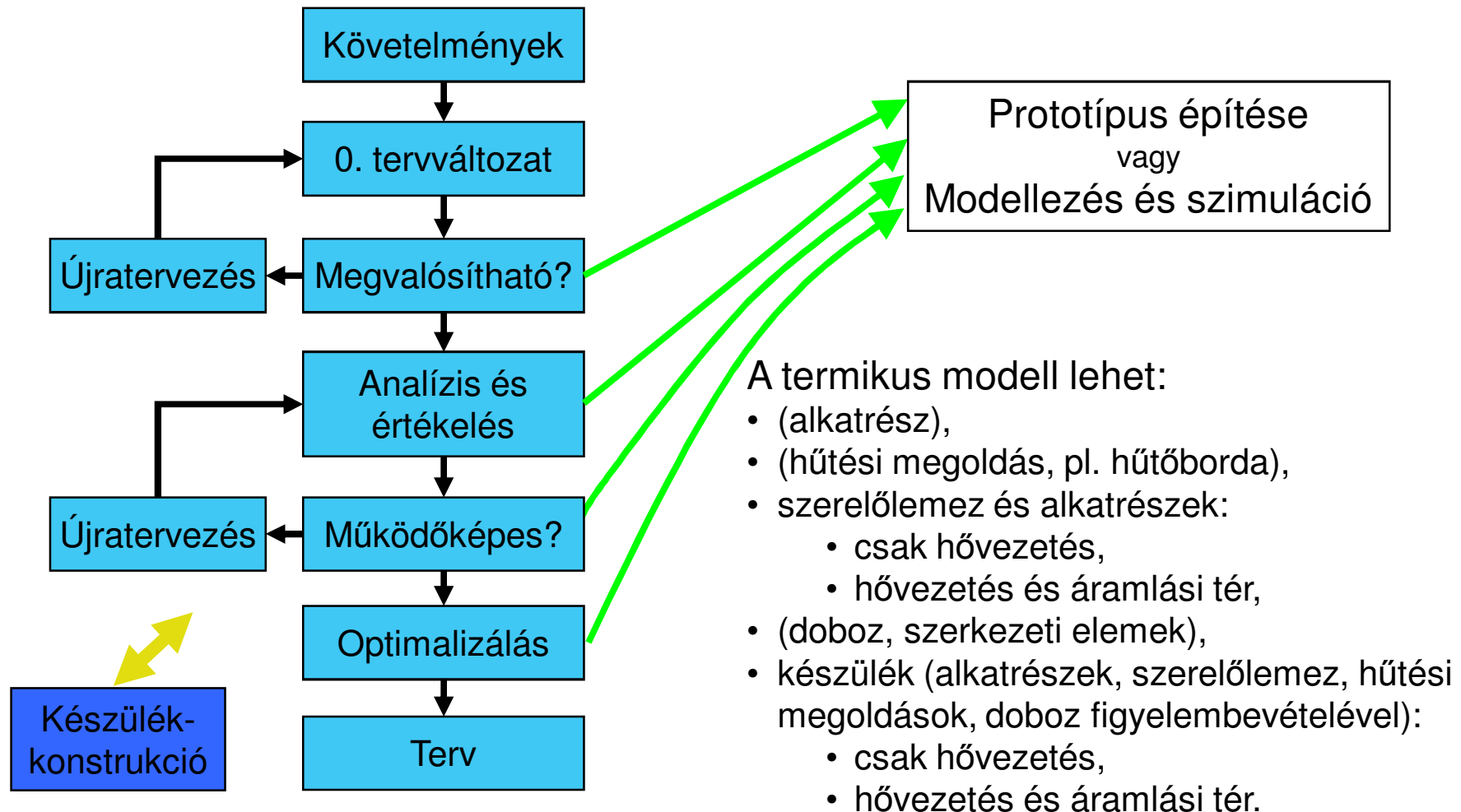
huzalozás hatása

környezet hatása



A TERMIKUS SZIMULÁCIÓ SZEREPE

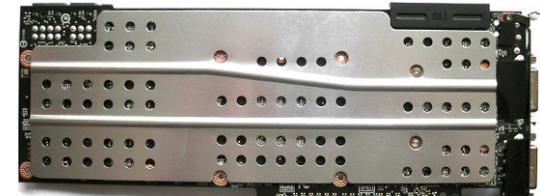
A termikus konstrukció tervezésének menete:



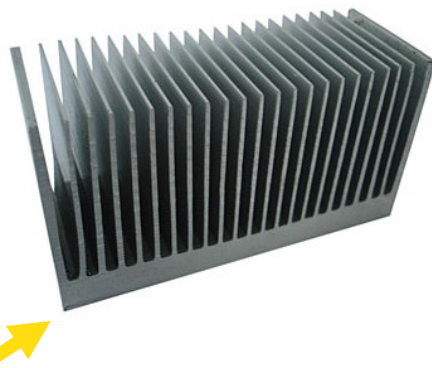
HŰTÉSI MEGOLDÁSOK – HŰTŐBORDÁK ÉS LEMEZEK

Megvalósítás szempontjai:

- a hőt jellemzően kis felületről kell elvezetni,
- lehetőleg nagy felületen kell leadni,
- termikus ellenállást minimalizálni kell,
- a megoldás legyen gazdaságos (anyag, megmunkálás),
- hőleadást mesterséges konvekcióval javítani lehet.



„Klasszikus” hűtőborda felépítése:



Lamellák:

- nagyobb felület => nagyobb hőleadás
- nagyobb felület => nagyobb hőellenállás
- kisebb vastagság => nagyobb felület
- kisebb vastagság => nagyobb hőellenállás
- kisebb vastagság => nehezebb megvalósíthatóság

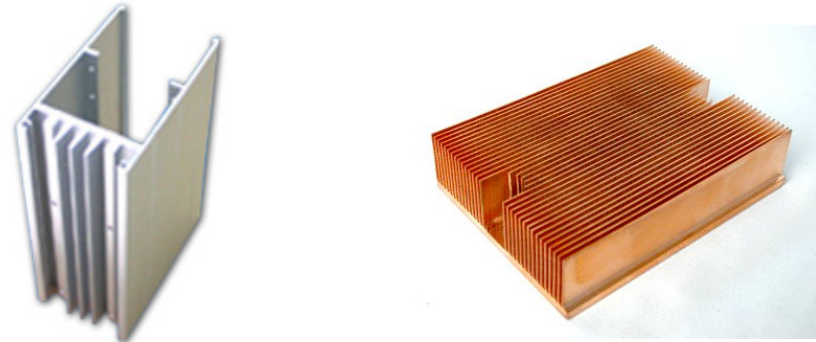
Talp:

- mérete igazodik a hűtendő felülethez,
- vastagabb talp => nagyobb hőkapacitás, jobb hőelosztás
- vastagabb talp => nagyobb hőellenállás

HŰTÉSI MEGOLDÁSOK – HŰTŐBORDÁK ÉS LEMEZEK

Hűtőbordák és lemezek anyagai:

- alumínium:
 - olcsó,
 - könnyen megmunkálható,
 - jó hőleadás.
- vörösréz:
 - magasabb ár,
 - nehezen megmunkálható,
 - jobb hővezetőképesség,
 - rosszabb hőleadás,
- (ezüst, fémhab, szénszálas kompozit, grafit, mesterséges gyémánt...).



Hőleadási tényező javítása: mesterséges konvekció

Ventilátorok alaptípusai:

- axiális,
- radiális.

Legfontosabb jellemzőik:

- fordulatszám,
- méret,
- lapátok dőlésszöge,
- lapátok kialakítása, felületének minősége.

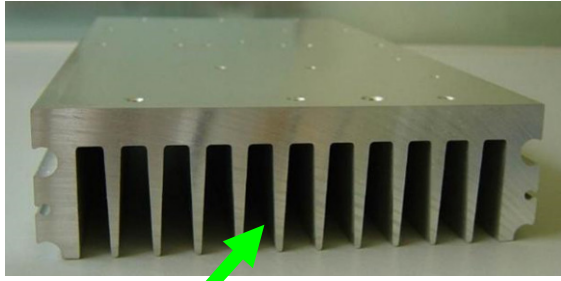


(c) 2002 Redax Systems GmbH



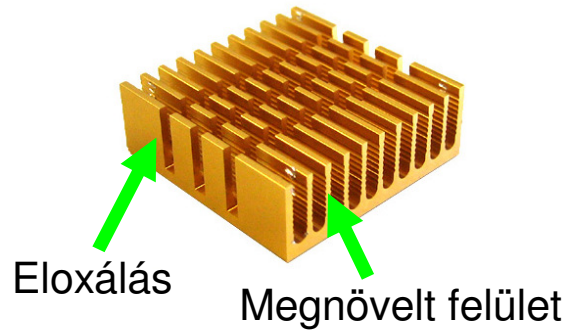
HŰTŐBORDÁK MEGVALÓSÍTÁSI FORMÁI

Egyszerű alumínium borda:



Elvékonyodó lamellák

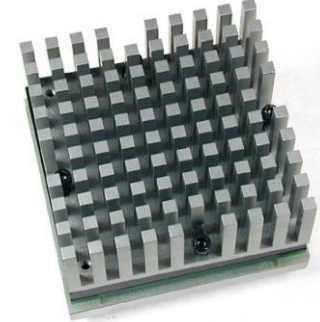
Továbbfejlesztett lamellák:



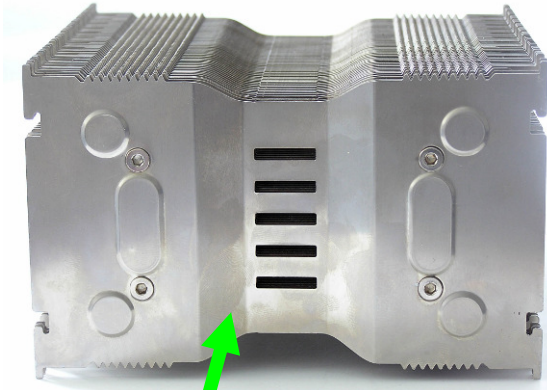
Eloxálás

Megnövelt felület

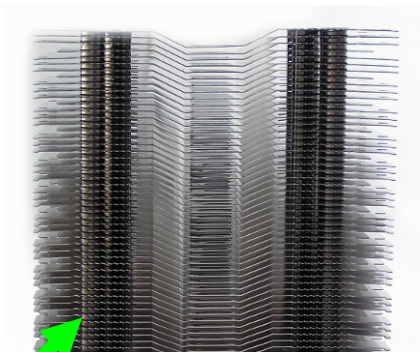
Kereszthornyos:



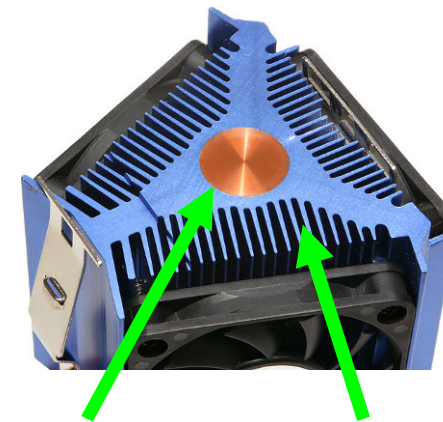
Szerelt borda:



Vékony (lemez) lamellák



Betétes borda:



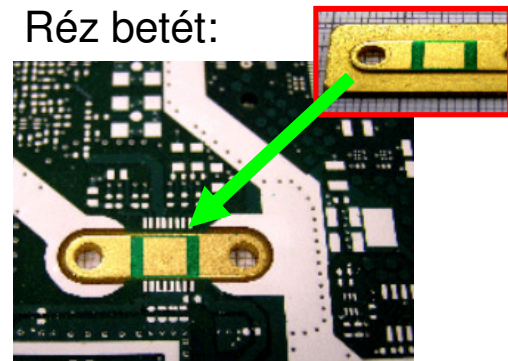
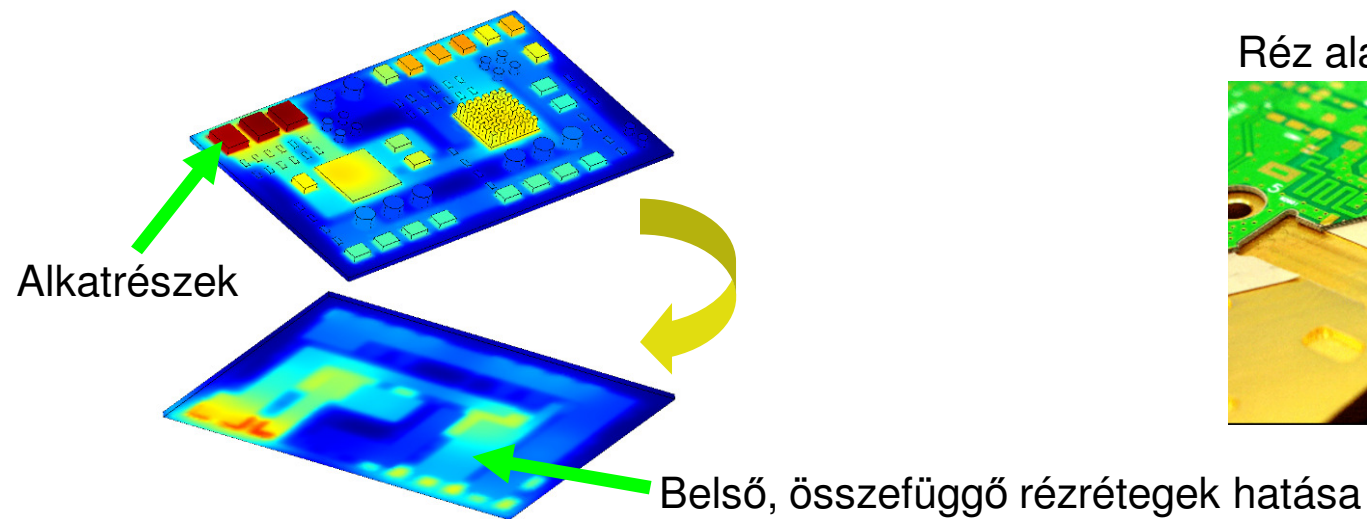
Réz betét (talp), alumínium lamellák

HŰTÉSI MEGOLDÁSOK – A SZERELŐLEMEZ

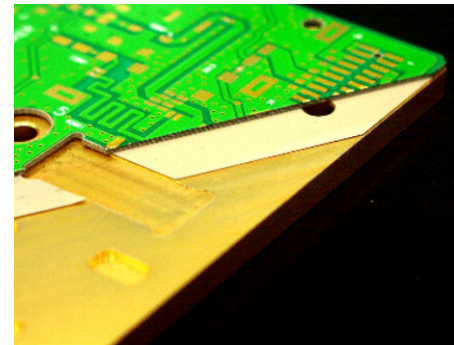
A szerelőlemez részt vesz az alkatrészekben disszipálódó hő elvezetésében.

A szerelőlemez termikus viselkedése javítható:

- több, egybefüggő rézréteg beépítésével a NYHL-be,
- fémbetét alkalmazásával,
- termikus viák alkalmazásával,
- nagy hővezető képességgel rendelkező hordozó alkalmazásával (pl. kerámia)

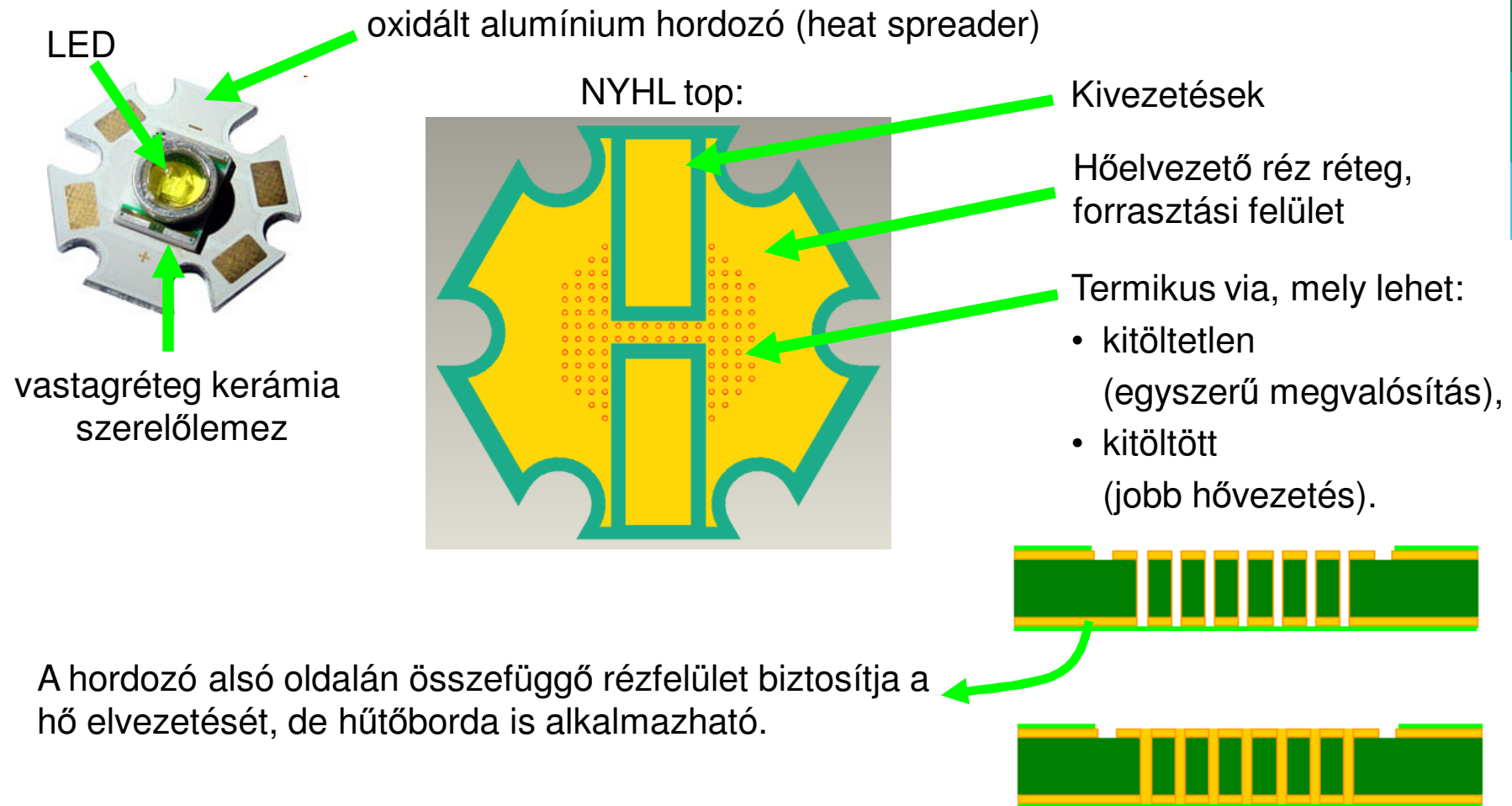


Réz alaplemez:



HŰTÉSI MEGOLDÁSOK – A SZERELŐLEMEZ

Termikus via alkalmazása (nagyteljesítményű LED példáján):



HŰTÉSI MEGOLDÁSOK - FOLYADÉKHŰTÉS

Kifejlesztésének motivációja:

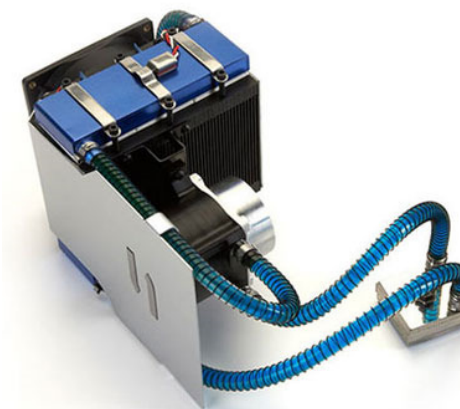
- a folyadékok fajhője nagyobb a gázokénál, ezért azonos térfogatú folyadék nagyobb hőmennyiséget képes elszállítani (levegő: $0,001 \text{ J.cm}^{-3}.\text{K}^{-1}$, víz: $4 \text{ J.cm}^{-3}.\text{K}^{-1}$),
- a folyadékok hővezetési tényezője nagyobb a gázokénál (levegő: $0,026 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, víz: $0,61 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), ezért a határfelületek hőleadási tényezője folyadékhűtés esetén nagyobb (levegő: $20 \dots 200 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, víz: $500 \dots 10000 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Jellemzői:

- nagy hűtési teljesítmény és alacsonyabb hőmérséklet érhető el (léghűtéshez képest),
- alacsony működési zaj,
- hosszú élettartam, megbízható működés, zárt rendszer (környezetből szennyezés nem jut be),
- megvalósítása, gyártása körülményesebb,
- mérete, tömege nagy, rázás-, ütésállósága kicsi.

Megvalósítási lehetőségek:

- indirekt,
- direkt.

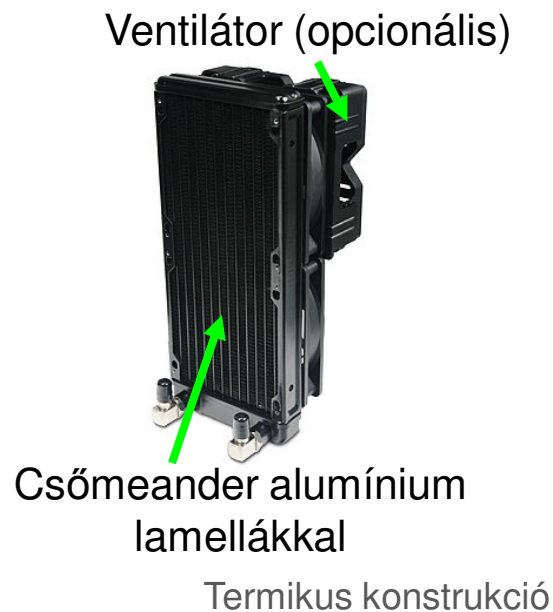
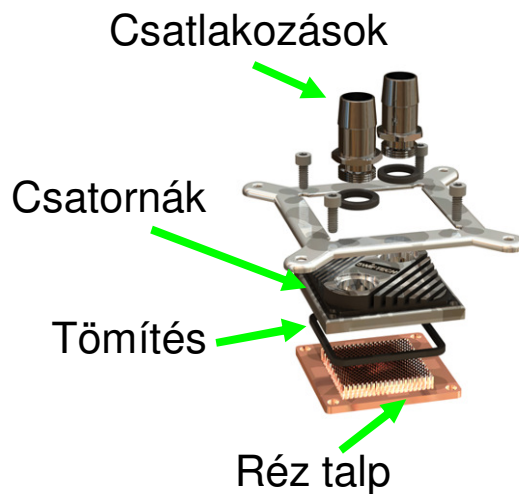
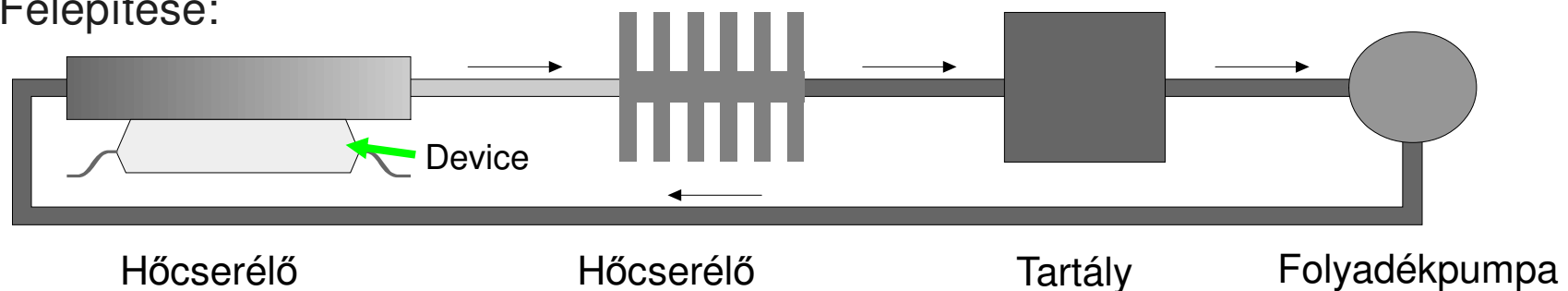


HŰTÉSI MEGOLDÁSOK – INDIREKT FOLYADÉKHŰTÉS

Indirekt folyadékhűtés:

a hűtőfolyadék közvetlenül nem érintkezik az elektronikus alkatrészekkel.

Felépítése:



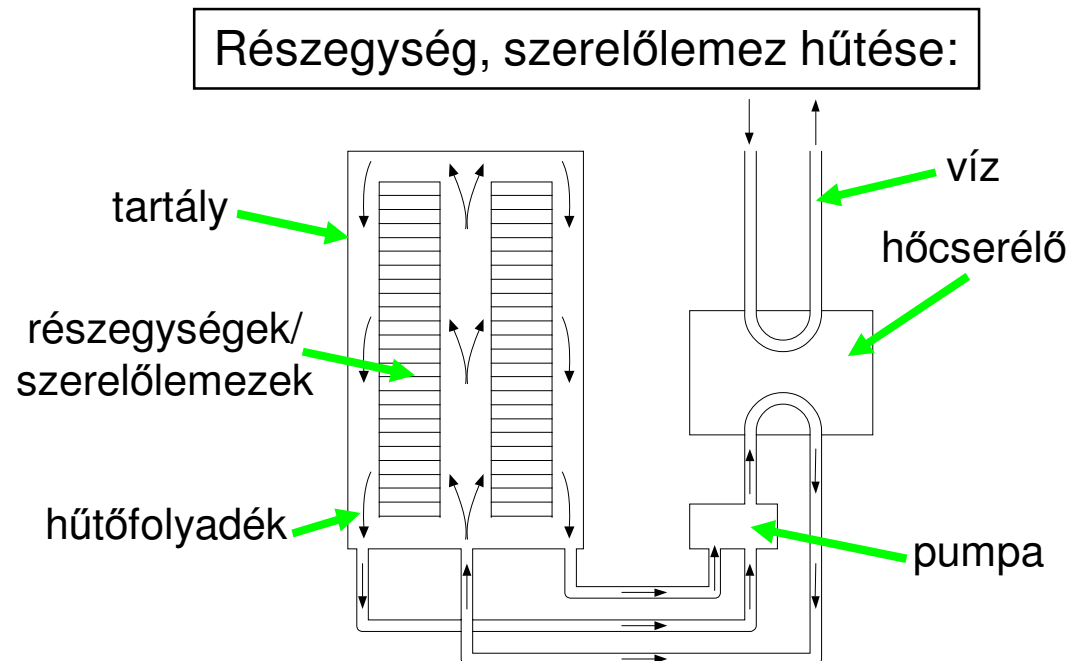
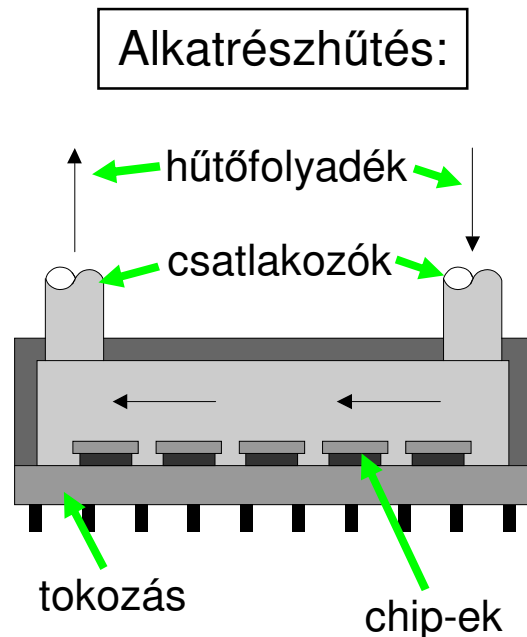
HŰTÉSI MEGOLDÁSOK – DIREKT FOLYADÉKHŰTÉS

Direkt folyadékhűtés:

a hőcserélő elhagyásával a hűtőfolyadék érintkezésbe kerül az alkatrészekkel.

Jellemzői:

- az alkatrészek és a hűtőfolyadék között a termikus ellenállás drasztikusan csökken,
- a hűtőfolyadék csak elektromosan szigetelő lehet,
- megvalósítása körülményes.

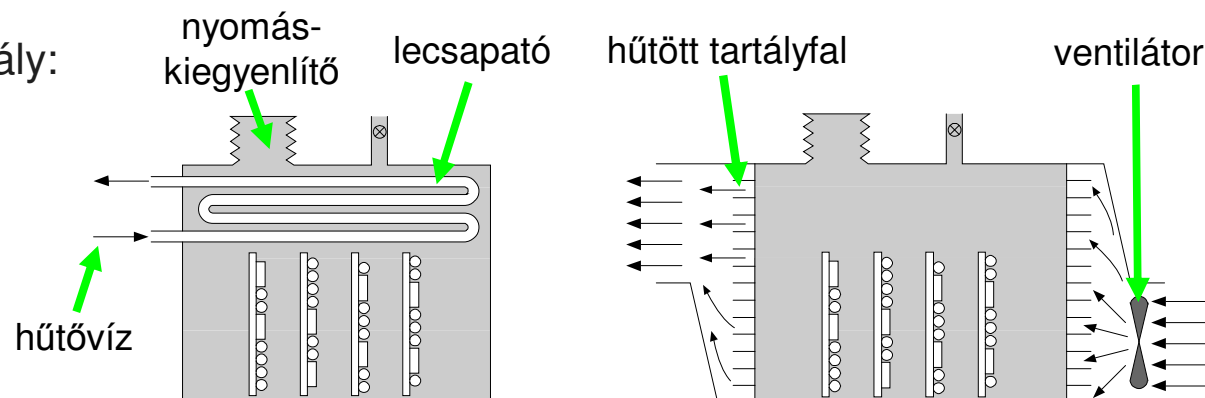
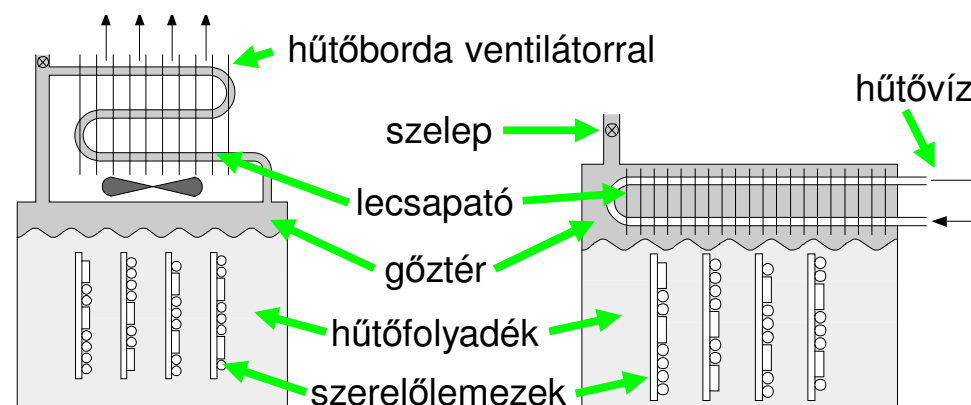


HŰTÉSI MEGOLDÁSOK – FÁZISÁTALAKULÁS

Kifejlesztésük motivációja, hogy a folyadékok elforralásával nagyobb hőt lehet elvonni, mint az áramoltatásukkal (pl. 1 kg víz 20-100 °C-ra melegítése 0,335 MJ, elforralása 2,26 MJ energiát igényel).

Megvalósítás lehetőségei:

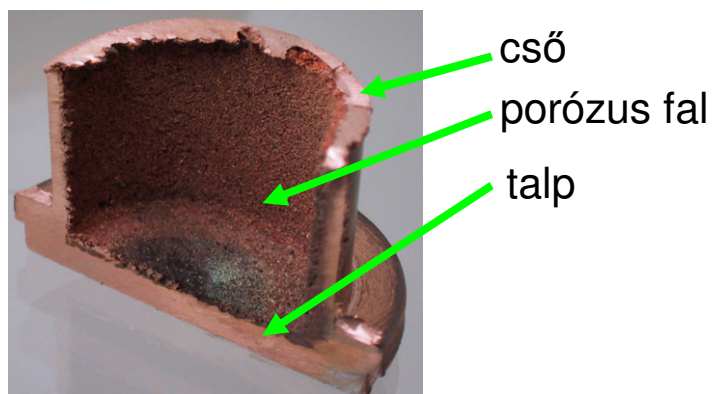
- direkt:
 - folyadéktartály gáztérrel:
 - külső lecsapatással,
 - belső lecsapatással,
 - folyadékkal feltöltött tartály:
 - lecsapatóval,
 - hűtött fallal.
- indirekt (heat pipe).



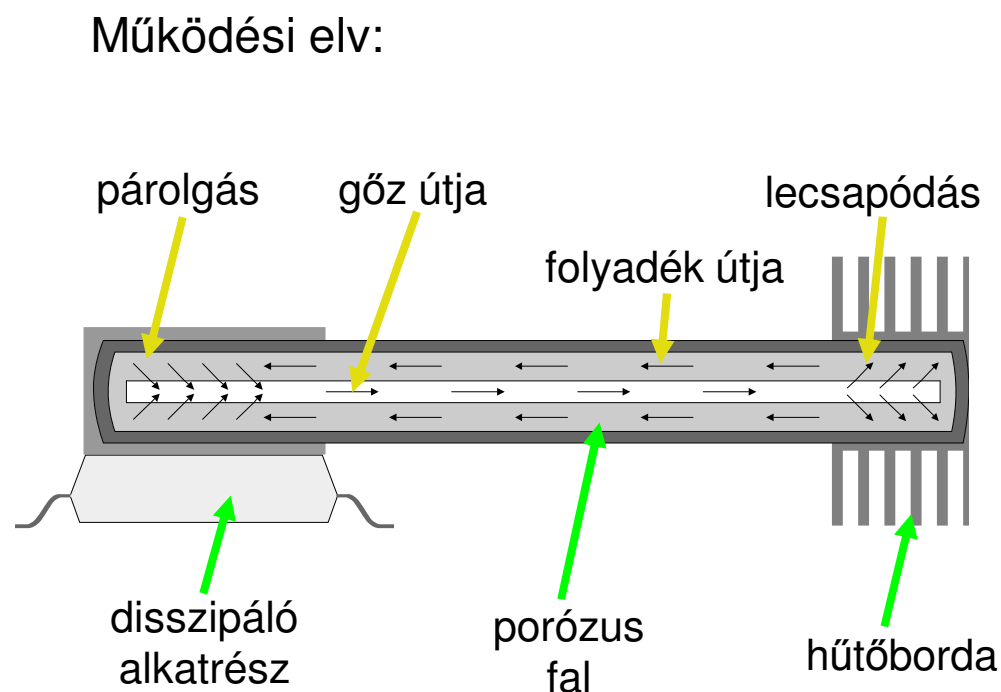
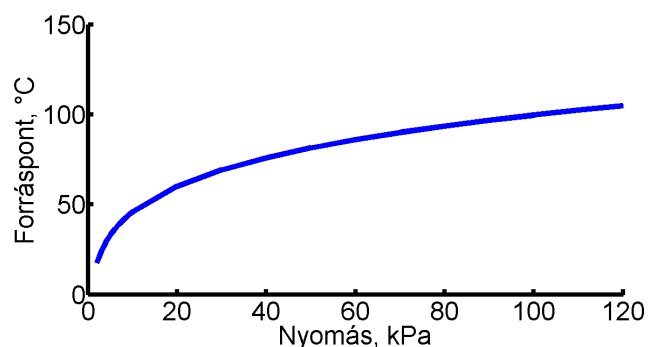
HŰTÉSI MEGOLDÁSOK – FÁZISÁTALAKULÁS

A hővezető cső (heat pipe): a fázisátalakulással működő hűtés megvalósítása kompakt kivitelben, a lehető legkisebb termikus ellenállás elérése érdekében. Hővezetőképessége 100...1000-szer akkora, mint a rézé.

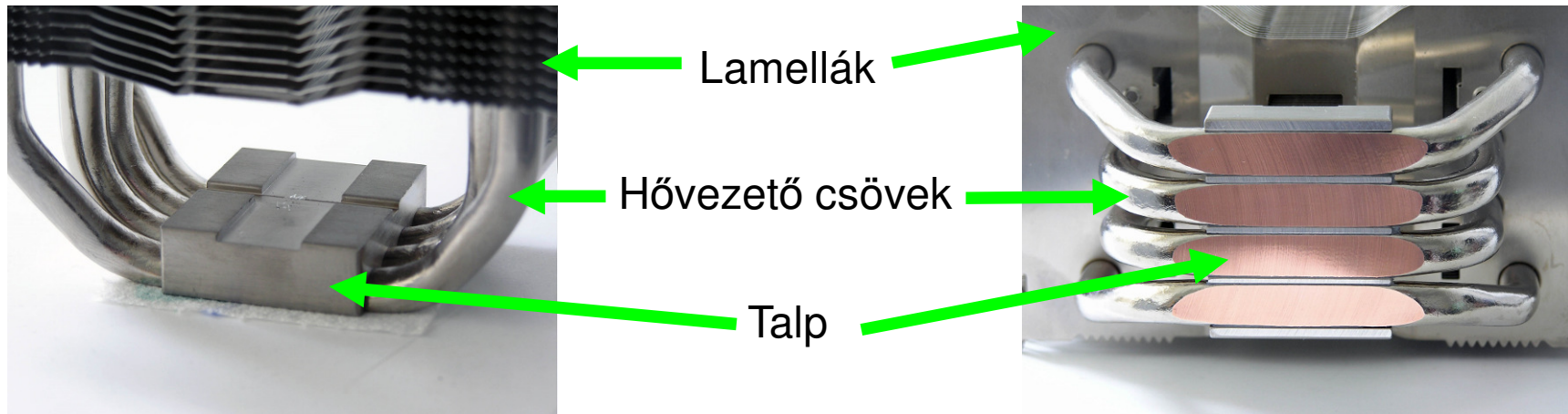
Felépítés: porózusfalú vákuumcső, kis mennyiségű folyadékkal (víz).



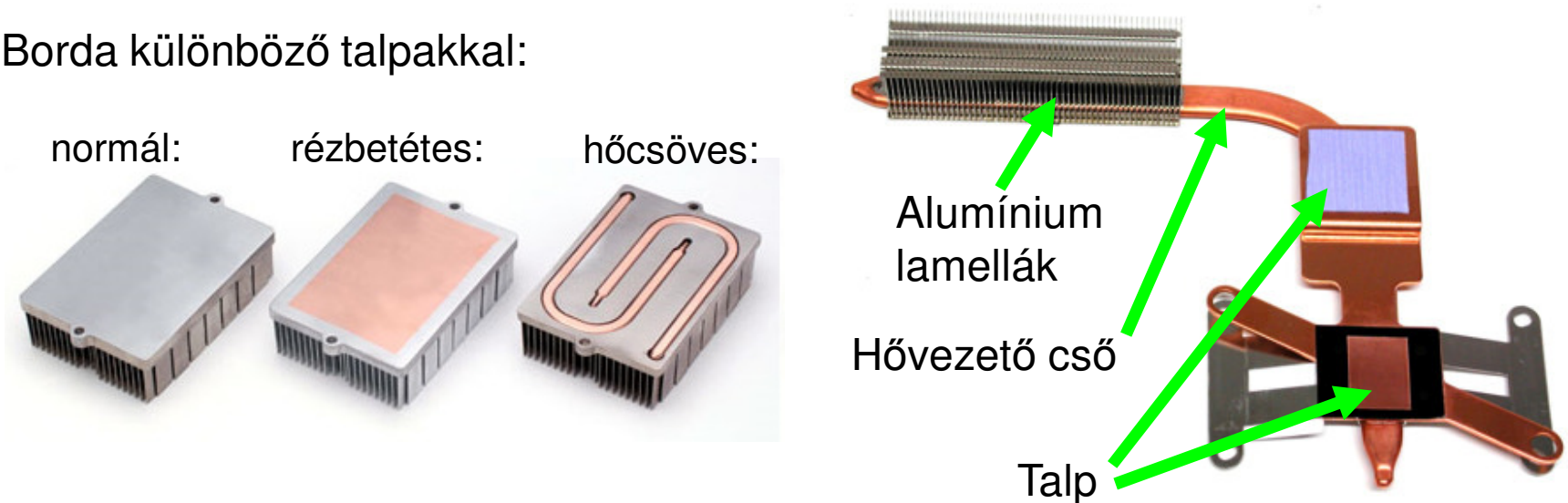
A csőben uralkodó nyomás szerepe:



HŰTÉSI MEGOLDÁSOK – HEAT PIPE, PÉLDÁK



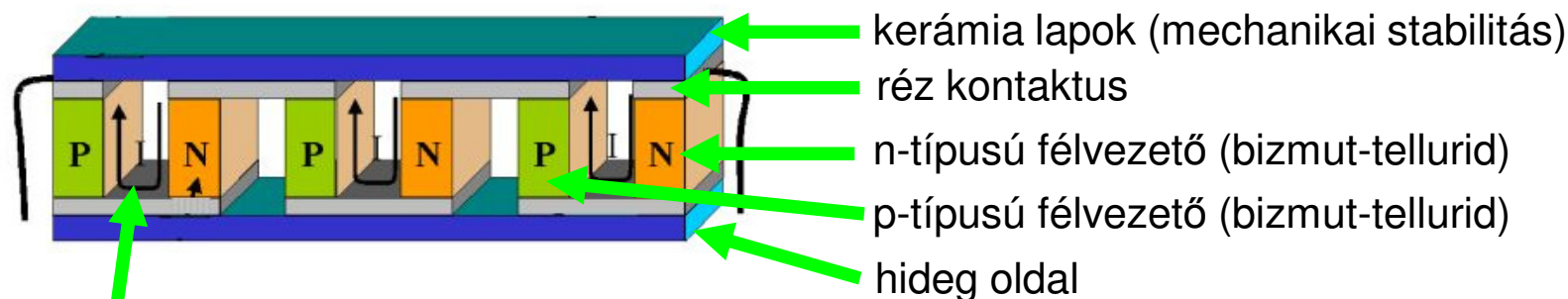
Borda különböző talpakkal:



HŰTÉSI MEGOLDÁSOK – PELTIER-HŰTÉS

Peltier-elem: félvezető alapú hőszivattyú (a meleg oldalról disszipálni kell!)

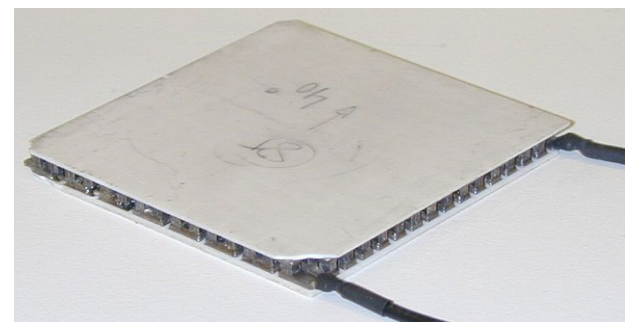
Felépítés és működési elv:



az átmenetek elektromosan sorba, termikusan párhuzamosan vannak kapcsolva

a külső energiaforrás segítségével áthajtott elektronok az alacsonyabb energiaszinttel rendelkező n-típusú félvezetőből a magasabb energiaszinttel rendelkező p-típusú félvezetőbe lépve a szükséges energiát a környezetből veszik fel.

Felhasználása üreszközökben és termikus zaj csökkentése esetén indokolt (pl. CCD chip), többlépcsős változattal $\sim -150^{\circ}\text{C}$ is elérhető.



KITEKINTÉS

Az elektronikus készülékek termikus konstrukciójának fejlesztési irányai:

- hővezető anyagok:
 - fejlesztésük napjainkban már nem jellemző,
- hűtési megoldások:
 - léghűtés: az ár és a felépítés bonyolultsága háttérbe szorul a teljesítmény mellett,
 - folyadékhűtés elterjedése, továbbfejlesztése,
 - kompresszoros hűtés,
 - fázisátalakulásra épülő, aktív hűtés,
- termikus interfészek:
 - minél könnyebb alkalmazhatóság, termikus ellenállás csökkentése,
 - a felületek minőségének javítása,
- funkciók összevonása a készüléken belül,
- modellezés alkalmazása (ököl szabályok helyett).