BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Dr. Székely Vladimír

Integrált áramkörök termikus szimulációja

Segédlet a Mikroelektronika laboratórium 1. méréséhez

Budapest, 2009. szeptember

A termikus szimuláció alapfogalmai

Ismeretes, hogy a hőátadás három különböző fizikai mechanizmus útján megy végbe: hővezetés (kondukció), hőáramlás (hőszállítás, konvekció) és hősugárzás. A kialakuló **hőáram sűrűséget** az egységnyi felületen egységnyi idő alatt átáramló hőenergiával adjuk meg, jele q, mértékegysége W/m^2. Az egyes hőátadási mechanizmusok hőáram sűrűsége az alábbi módon számolható:

<u>Hővezetés</u> $q = -\lambda \cdot \mathrm{grad}\, T$

– ahol T a hőmérséklet, λ a fajlagos hővezetési együttható. Utóbbi mértékegysége W/mK. Ezt az egyenletet *Fourier törvénynek* is nevezik.

<u>Hőáramlás</u> $q = h \cdot (T - T_\infty)$

– ahol T a hőleadó felület hőmérséklete, T_∞ a távoli környezet hőmérséklete, h a felület hőátadási együtthatója. Utóbbi mértékegysége W/m^{2}K.

<u>Hősugárzás</u> $q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$

– ahol $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/m^{2}K^4 a Stefan-Boltzmann állandó, ε (emisszivitás) a felület feketeségét megadó tényező. Utóbbi zérus a tökéletes tükröző felületnél, 1 az "abszolút fekete" felület esetén.

Az integrált áramköri tokok hőleadásában általában a hővezetés a meghatározó. Nyomtatott panel vizsgálatánál az áramlást is figyelembe kell vennünk. A hősugárzás első közelítésben sokszor elhanyagolható.

A hővezetés alapegyenletét a következő módon írhatjuk fel. Kiindulunk a hőáram sűrűségre vonatkozó folytonossági egyenletből:

$$\mathrm{div}\, q = g_v - c_v \frac{dT}{dt}$$

– ahol c_v [Ws/m^3] a térfogategységre vonatkoztatott fajlagos hőkapacitás, g_v a térfogategységben végbemenő hőgeneráció. Ide behelyettesítve a Fourier törvényt

$$-\mathrm{div}\, \lambda \cdot \mathrm{grad}\, T = g_v - c_v \frac{\partial T}{\partial t}$$

Ezt a helytől és időtől függő differenciálegyenletet kell megoldanunk a hővezetési problémák szimulációja során.
Az egyenlet sokkal egyszerűbbé válik, ha a λ és c anyag-paramétereket a hőmérséklettől függetlennek tekintjük és a stacionárius megoldásra ($\partial/\partial t = 0$) szorítkozunk:

$$\mathrm{divgrad}\, T = \frac{g_v}{\lambda}$$

Vegyük észre, hogy az elektrosztatikából is ismert Poisson egyenletre jutottunk. Ha a vizsgált térben nincsenek hőforrások ($g_v = 0$), az összefüggés még egyszerűbb:

$$\mathrm{divgrad}\, T = 0$$

Ez a Laplace egyenlet.

Egy fizikai probléma vizsgálatánál a szimuláció egy elhatárolt térrészre terjed ki (pl. az IC lapka, mint téglatest). Hogy a feladat egyértelmű legyen, meg kell adnunk az ezen térrész határán uralkodó határfeltételeket (boundary conditions). Három ilyen határfeltétel fajta ismeretes:

Elsőrendű (Dirichlet féle) határfeltétel $T(\mathbf{x},t) = f(\mathbf{x},t)$

(T természetesen konstans vagy zérus is lehet: $T(\mathbf{x},t) = const$, ez az izotermikus határfeltétel)

Másodrendű (Neumann féle) határfeltétel $-\lambda \dfrac{\partial T}{\partial n} = q(\mathbf{x},t)$ (n a normális irány)

(q természetesen zérus is lehet: $q(\mathbf{x},t) = 0$, ez az "adiabatikus" határfeltétel, hőszigetelt felületnek ez felel meg).

Harmadrendű (Robin féle) határfeltétel $-\lambda \dfrac{\partial T}{\partial n} = h \cdot \left(T(\mathbf{x},t) - T_\infty\right)$

(ez a konvekciós hőátadás esete).

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

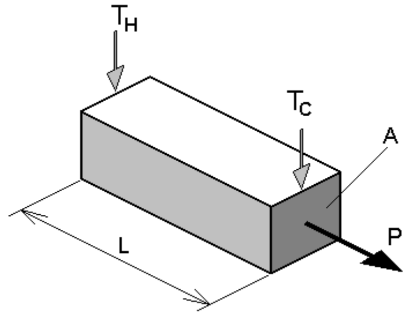
A hőátadás jellemzésére a **hővezetési ellenállást** *(hőellenállás, thermal resistance*) használjuk. Ha egy hővezető "hasáb" két vége között $\Delta T = T_H - T_C$ hőmérséklet különbség van, és ennek hatására P hőteljesítmény *(disszipálódó teljesítmény*) áramlik át rajta, akkor a hőellenállás

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P} \quad .$$

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

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

- ahol A a hővezetési szakasz keresztmetszete, L a hosszúsága.
Figyeljük meg a nyilvánvaló analógiát az elektromos vezetéssel!



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

$$C_{th} = \frac{W}{\Delta T} \quad .$$

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

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

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

$$\tau_{th} = R_{th} \cdot C_{th} \quad .$$

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

1. az eszköz aktív *(hőtermelő*) zóna és az eszköztok közötti belső hőellenállás *(tokkonstrukci*ó) – R_{thjc} *(junction-case*)
2. az eszköztok és a környezet közötti hőátadás *(javítása érdekében hűtő szerelvény – méret, nagyság, bordázat, forszírozott légáram…*) – R_{thca} *(case-amibent*)

R_{thjc} általában jóval kisebb mint R_{thca} .
A félvezető eszközök belső hőátadása szinte mindig **hővezetéssel** történik.
A hűtő szerelvénynek hővezetéssel adja át az eszköztok a hőt, abban (pl. egy hűtőszárnyban) vezetéssel terjed tovább, majd annak felületét természetes vagy mesterséges folyadék/légáramlás hűti *(Hőszállítás, konvekció – szilárd test és vele érintkező áramló gáz vagy folyadék között jön létre hő átadás*.).
Az eszköz belső hőmérsékletét (T_j) a környezet hőmérséklete és a disszipált teljesítmény határozza meg:

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

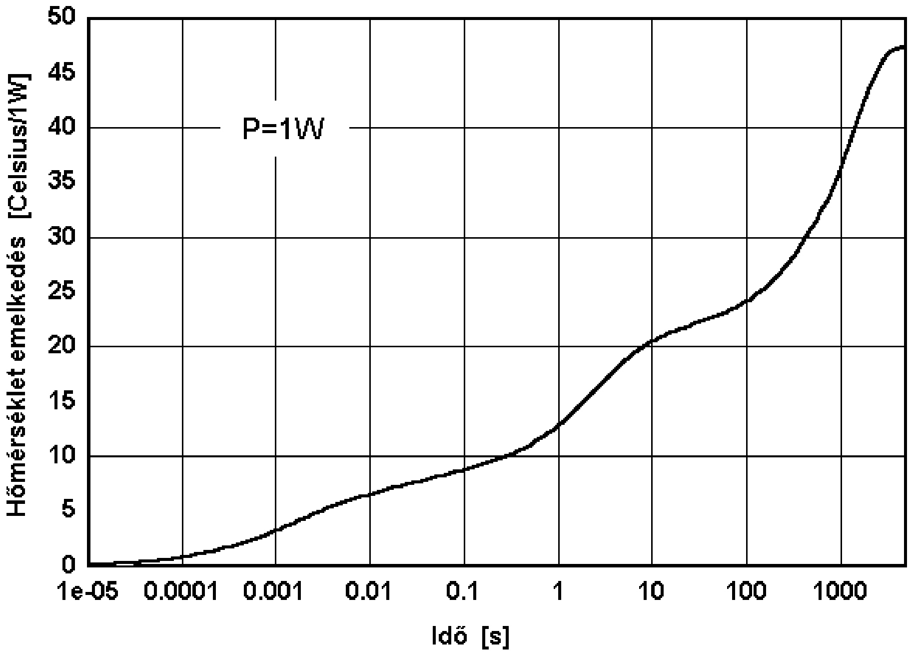
Az integrált áramköröknél az IC alkatrészei eltérő mértékben disszipálnak, azaz a chip felületi hőmérséklet-eloszlása nem egyenletes *(A felület disszipáló elemekkel való átlagos kitöltése általában maximum 20-30%-os*.). A kialakuló hőmérséklet- és hőáram eloszlás vizsgálatára alkalmasak a termikus szimulációs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

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

A hőelvezetés dinamikus tulajdonságai a frekvenciatartományban a komplex értékű termikus impedanciával jellemezhetők. Ha például szinuszos a disszipációs terhelés, ezt így írhatjuk: $p = p_1 \exp(j\omega t)$. Ennek hatására szintén szinuszos $T = T_1 \exp(j\omega t + \quad)$ hőmérséklet változás keletkezik az eszközön. E kettő hányadosából számítható a **termikus impedancia**:

$$\boldsymbol{Z}_{th} = \frac{T_1}{p_1}\exp(j\cdot\ )$$

A hőelvezetés dinamikus tulajdonságait az időtartományban többnyire az egységugrás disszipáció gerjesztésre adott termikus válaszfüggvénnyel jellemezzük. Ez az úgynevezett **melegedési görbe** (*heating curve*). Ilyen görbét látunk az alábbi ábrán, a szokásos logaritmikus idő-tengely mentén. A függvény végértéke a stacionárius hőellenállás.



A szimulációs feladatokhoz segítség az alábbi néhány adat:

Integrált áramkörök átlagos technológiai paraméterei

Si hordozó átlagos vastagsága: 200-350 µm
Vastag oxid átlagos vastagsága: 0,5 µm
Vékony oxid (gate oxid): 60 nm
Diffúzió átlagos mélysége: 1-2 µm
Fémezés átlagos vastagsága: 0,5 µm

Nyomtatott áramköri hordozók szokásos méretei

Fr4 hordozó vastagsága: 0,5-2 mm
Cu fémezés vastagsága: 17 – 35 – 70 µm

Kérdések

1. Mit nevezünk hővezetési ellenállásnak?
2. Mi a hővezetési ellenállás mértékegysége?
3. Mi a fajlagos hővezetési együttható mértékegysége?
4. Mit nevezünk hőkapacitásnak?
5. Mi a hőkapacitás mértékegysége?
6. Mit nevezünk termikus időállandónak?
7. Írja fel a hővezetés Laplace egyenletét!
8. Írja fel a hővezetés hőáram sűrűségének egyenletét!
9. Írja fel a hőáramlás (hőszállítás) hőáram sűrűségének egyenletét!
10. Írja fel a hősugárzás hőáram sűrűségének egyenletét!
11. Mit nevezünk emisszivitásnak?
12. Mit nevezünk hőátadási együtthatónak?
13. Mit nevezünk melegedési görbének?
14. Mivel egyenlő a melegedési görbe végértéke?

Szimulációs feladatok

Egy integrált áramkör 2x2x0,35 mm-es Si lapkája 1 mm vastag Cu lemezre van forrasztva, utóbbi alja konstans 25 ^oC-on van. A lapkán egy 5W-ot disszipáló tranzisztort kell elhelyeznünk. Három megoldással próbálkozunk: a lapka közepe, egyik oldalél közepe, egyik sarok. Hasonlítsuk össze az eredményeket, vonjuk le a tanulságot.

Egy műveleti erősítő IC lapka méretei 1x1x0,3 mm, a tok hűtő hatását az alsó felületen h=2000 W/m^2K hőátadási tényezővel vesszük számításba. A kimeneti fokozat két tranzisztora 400x50 μm méretű, a bemeneti diff.erősítő tranzisztorai 25x25 μm méretűek. Helyezzük el úgy a 4 tranzisztort, hogy a kimeneti tranzisztorok disszipációja ne okozzon hőmérséklet különbséget a bemeneti diff.erősítő tranzisztorai között. (Miért ne okozzon?)

Egy műveleti erősítő IC lapka méretei 1x1x0,3 mm, a tok hűtő hatását az alsó felületen h=2000 W/m^2K hőátadási tényezővel vesszük számításba. A lapka egyik oldalán egy 600x40 μm méretű végtranzisztor helyezkedik el, a másik oldalán a bemeneti erősítő 30x30 μm méretű tranzisztorai. A végtranzisztor disszipációja $P = P_0 + P_1 \sin(\omega t)$ lefutású. Állapítsuk meg, hogy mely frekvencián 45^o a fázistolása a bemeneti tranzisztorokra jutó szinuszos hőmérséklet változásnak! Mekkora ezen a frekvencián e hőmérséklet változás amplitúdója?

Egy szilícium alapú MEMS[1] struktúrában 1x1 mm méretű, 3 μm vastagságú Si membránt alakítunk ki. A membrán közepén egy 50x50 μm méretű disszipáló ellenállást hozunk létre. A membrán pereme izotermikusnak tekinthető. Határozzuk meg, hogy kb. hány mW disszipáció mellett melegszik a membrán középpontja 200^oC-al a szobahőmérséklet fölé! Végezzük el a számítást Kirchhoff transzformációval is, és hasonlítsuk össze az eredményeket. Vonjunk le következtetést!

Egy szilícium alapú MEMS struktúrában 200 μm hosszú, 100 μm széles konzolt alakítunk ki. A konzol anyaga 5 μm Si, 2 μm SiO_2. A konzol végén 160x20 μm méretű disszipáló elem van. A konzol hőmérsékletét a disszipáló elemtől 20 μm távolságban mérjük. Határozzuk meg az így adódó négyzetes karakterisztikájú elem transzfer hőellenállását és 3 dB-es határfrekvenciáját! Hogyan változik ez a két adat, ha a konzol hosszát felére vesszük?

Egy 100x150 mm méretű, 1,5 mm vastagságú FR4 nyomtatott panelt vizsgálunk. A kétoldali, 35 μm vastagságú Cu fémezést 25 % kitöltéssel vegyük figyelembe. A panel rövidebbik élén a csatlakozót ideális izotermikus határfeltétellel számoljuk. A panel két oldalán h=10 W/m^2K hőátadási együtthatóval számoljunk. Helyezzünk el egy 5 W disszipációjú, 15x15 mm méretű IC-t a panelon a) a csatlakozótól távoli sarokban, b) a panel közepén, c) a csatlakozó közelében. Hasonlítsuk össze és értékeljük az eredményeket.

Egy 12x12 mm-es, 0,67 mm vastagságú Al_2O_3 kerámia lapkán 100 μm széles, 25 mm hosszú ellenálláscsíkot alakítunk ki. A lapka két sarkára kivezető drótot forrasztunk, melyek hőellenállása a környezet felé 500 K/W. Határozzuk meg a lapka hőmérséklet eloszlását, ha az ellenálláscsík 0,2 W-ot disszipál! Határozzuk meg, hogy egy 5W, 0,1 s impulzus esetén mekkora maximális hőmérséklet emelkedés jön létre a lapkán!

Vizsgáljunk egy 2x2x0,35 mm méretű Si IC lapkát! A lapka alsó felületén a tokot 2000 W/m^2K hőátadási együtthatóval modellezzük. A lapka közepén elhelyezünk egy 0,02x1,6 mm méretű ellenállást, a) téglalap geometriával, b) meanderré hajtogatva (S alak elegendő). Az ellenállás 0,2 W-ot disszipál. Határozzuk meg a hőmérséket eloszlást mindkét esetben, vonjuk le a tanulságot!

---
[1] Micro-Electro-Mechanical System