

A termikus szimuláció szerepe a nagybonyolultságú mikroelektronikai eszközök és elektronikai áramkörök konstrukciós tervezésében

1. Bevezetés

Egy elektronikus áramkörben disszipált teljesítmény hőmérséklet-emelkedést okoz. Ha egy készülék konstrukciós kialakítása nem felel meg a hőviszonyok követelményeinek, akkor a készülék élettartama csökken, megbízhatósága folyamatosan romlik, sőt katasztrofális meghibásodás léphet fel. A félvezető eszközök meghibásodási tényezője pl. duplázódik, ha a pn átmenetek hőmérséklete 8–10 °C-kal emelkedik [1].

Az elektronikai berendezésekben rohamosan nő a funkcióssűrűség, a működési sebesség és a teljesítménysűrűség. A jelenlegi mikroelektronikai eszközök disszipációs teljesítménysűrűsége már meghaladja a $10^6 \frac{W}{m^3}$ -t [2]. Ezért a termikus tervezés problémái egyre fontosabb szerepet játszanak az áramkörök (berendezések) konstrukciós tervezési folyamatában.

Ebben a cikkben a nagybonyolultságú mikroelektronikai eszközök és elektronikai áramkörök konstrukciós jellemzőit figyelembe vevő általános — konstrukciós szinttől független — termikus modell ismertetésére kerül sor. Egy a stacionárius állapot szimulációjára kidolgozott számítási módszert is bemutatunk. A stacionárius termikus állapot viszonyainak ismerete alapvető fontosságú, mivel elsősorban ez befolyásolja az eszközök működését és megbízhatóságát.

2. A nagybonyolultságú mikroelektronikai eszközök és áramkörök konstrukciós kialakításának jellemzői a termikus viselkedés szempontjából

Napjainkban a mikroelektronikában egyre nő a berendezések (eszközök) funkcióssűrűsége és működési sebessége. Ezzel együtt a teljesítménysűrűség is rohamosan növekszik. Ezek egyre újabb konstrukciós megoldásokat és technológiákat követelnek. Az elmúlt években szerte a világon nagy intenzitással foglalkoztak és foglalkoznak a nagybonyolultságú mikroelektronikai eszközök és áramkörök új konstrukciós elveinek és tervezési módszereinek kidolgozásával.

Napjainkban alapvetően három tokozási elrendezést használnak [3]:

1. A nyomtatott lapra szerelt DIP tokozású áramkör;
2. „Anyá” chip-tartóra (Chip Carrier-re) szerelt több chip-tartó és
3. Hibrid hordozóra szerelt chip-tartók.

A fentiek alapján látható, hogy a mikroelektronikai eszközök és áramkörök konstrukciós struktúrája hierarchikusan tagolható. Az elektronikus berendezések általános konstrukciós szintrendszerét figyelembe véve [4], az áramköri egységek szintje kibővíthető 3 további szintre (mikroelektronikai áramkörök konstrukciós hierarchiája). Ezeknek a szinteknek a hierarchikus rendszerét elsősorban a megvalósított technológiák határozzák meg. E három konstrukciós szint a következő:

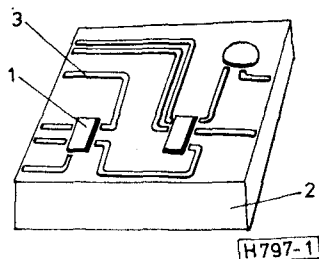
1. szint: Félvezető chip (Bipoláris és MOS technológiák és variánsaik).
2. szint: Hibrid integrált áramkör (vákuumgőzöléses és katódporlasztásos vékonyréteg, ill. szitanyomtatásos vastagréteg technológiák).
3. szint: Nyomtatott áramkör (szubtraktív és additív technológiák és variánsaik).

A fenti felbontás csak egy a sok lehetséges közül, amely a termikus vizsgálatok szempontjából eléggé szemléletes és jól alkalmazható. Egyes esetekben a hibrid áramkör átveheti a nyomtatott lap szerepét, a 3. szint ilyenkor megszűnik. Más esetekben (pl. ha több hibrid áramkört szerelünk egy nyomtatott lapra) a 3. szintnek is van szerepe. Megint más esetekben a 2. szint maradhat ki (pl. DIP-elemek a nyomtatott huzalozású lapokon).

Ez a szintrendszer is rendelkezik az általános tulajdonságokkal [4], például:

- Mindegyik szint eleme nála magasabb szint építőeleme.
- Mindegyik szint elemei önállóan modellezhetők a konstrukciós tervezés szempontjából.

A termikus tervezés (a konstrukciós tervezés egyik fontos fázisa) szempontjából mind a három szint esetén egy közös modellhez juthatunk. A termikus



1. ábra. Általános vizsgált struktúra
1. Hőforrás, 2. Hőátadó közeg (hordozó), 3. A hordozón realizált vezeték

modell 3 lényeges elemet tartalmaz. Ezt az 1. ábra szemlélteti.

Megjegyzendő, hogy a fenti 3 elem szoros összefüggésben van a tokozásrendszer alapvető összetevőivel: a funkcionális résszel, hordozó résszel és a közvetítő résszel [4].

A hőforrás a hőt termelő elem, geometriáját nézve négyzetesnek vagy kör alakúnak tekinthető. A hőforrások az 1. szintnél a pn átmenetek, a MOS-csatornák; a 2. szintnél a félvezető chipek és ellenállások; míg a 3. szintnél IC-tokok (beleértve a HIC-tokokat is) és diszkrét alkatrészek.

A hőátadó közeg valamennyi szintnél elsősorban a hordozó szerepét betöltő elem: a Si chip (1. szint), a kerámia hordozó (2. szint) és a szereletlen nyomtatott lap (3. szint).

A hordozón (szinttől függően különböző technológiákkal) realizált vezetők minden szinten jelen vannak; ezek biztosítják a villamos összeköttetést, de részt vesznek a hőátadásban is.

A fenti 3 elemen kívül még néhány kiegészítő elemet sorolhatunk fel, például: chip bekötési huzalok, toklábak, a környezeti levegőbe való konvekciós és sugárzási hőátadásban részt vevő tokok stb. (Ezek a kiegészítő elemek a konkrét esetektől függően szerepelnek vagy hiányoznak.)

A fentiek alapján végül is konstrukciós szinttől független termikus modellezés lehetőségéhez juthatunk, amely a konstrukciós színhierarchiának megfelelően egy termikus modellhierarchiát eredményez.

3. A mikroelektronikai eszközök és áramkörök termikus analízisének módszereiről

A mikroelektronikai eszközök termikus analízisének feladatát a teljes tokozási rendszer bonyolult geometriája igen nehezíti. Bár a hőterjedési utak változhatnak a tokozásrendszertől függően, a hőátadás két jól elkülöníthető részre bontható, ami minden konstrukciós szintre vonatkozik:

- Belső hőátadás (az eszközökön, ill. az áramkörökön belül).
- Külső hőátadás (a környezet felé).

A belső hőátadás főleg vezetéssel történik, mivel mind a konvekció, mind a sugárzás a felület nagyságának függvénye (ez a mikroelektronikai eszközök-

ben, ill. áramkörökben viszonylag kicsiny). Tokozott alkatrész esetén a tokba bezárt gáz általában rossz hővezető, ami ugyancsak hozzájárul a belső konvekciós hőátadás elhanyagolhatóságához.

A külső hőátadás — amely konvekcióval és/vagy sugárzással történik — a szerelési technikától és a környezettől függ.

Belátható, hogy a mikroelektronikai eszközökben és áramkörökben a vezetés a fő hőátadási mód és a belsejükben levő hőmérséklet-eloszlást a hővezetési parciális differenciálegyenlet megoldása adja meg. Ennek általános alakja [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \Delta T + \frac{1}{C_p \cdot \rho} \cdot \omega, \quad (1)$$

ahol T : a hőmérséklet [K], [°C].

t : az idő [s],

λ : a hővezetési tényező $\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$,

C_p : a fajhő $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$,

ρ : a sűrűség $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$,

ω : a hővé átalakuló fajlagosteljesítmény $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^3} \right]$

(feltételezzük, hogy λ konstans).

Állandósult esetben (1)-ből

$$\Delta T = -\frac{1}{\lambda} \cdot \omega \quad (2)$$

írható; állandósult, forrásmentes esetben pedig (1)-ből a közismert Laplace egyenlethez jutunk:

$$\Delta T = 0. \quad (3)$$

Az (1), ill. (2) és (3) egyenlet megoldására több módszer áll rendelkezésünkre.

Az egyik az analitikus módszerek csoportja, amely az eszköz, ill. áramkör geometriai felépítésére vonatkozólag egzakt, zárt formájú megoldást eredményez. Carslaw és Jaeger [6] pl. általános módszereket dolgoztak ki egyszerű geometriai alakzatokra. Kissé bonyolult feladatokra is számos analitikus módszer született. Ezek pl. a következők:

- Távvezeték-differenciálegyenlet megoldásának analógiájával [7].
- Fourier és Laplace transzformációval [8], [9], [10], [11], [12], [13].
- Schwarz—Christoffel-féle transzformációval [14].
- Green függvényvel [15]

működő számítási eljárások.

A bonyolultabb geometriai alakzatok esetén a termikus problémákat numerikus módszerekkel oldják meg:

– A véges differenciák módszere széles körben használatos. Ennek lényege az, hogy az áramkört (ill. eszközt) ésszerű mennyiségű térfogat-, ill. felületdarabra osztjuk fel, úgy, hogy azokon már konstans anyag- és termikus jellemzőket lehessen feltételezni.

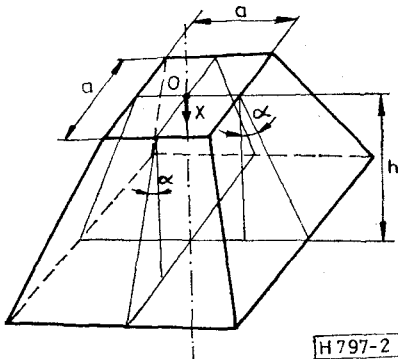
Az ilyen felület-, ill. térfogatarabok (amelyekhez „csomópontokat” rendelünk) között termikus ellenállásokat (R_T) és termikus kapacitásokat (C_T) lehet definiálni. Ezekkel stacionárius állapot-, ill. tranziensanalízis feladatot oldhatunk meg R_T vagy R_T és C_T figyelembevételével. Az analízis feladat ilyen megoldása egyenértékű a parciális differenciálegyenlet diszkretizálásával [16], [17], [18].

— Az elektromos-termikus analógiai módszer a termikus probléma és a koncentrált paraméterű hálózatok közelítő analógiájának elvén alapszik. A termikus viselkedést modellező hálózatban minden csomópontpár között a hűtőknek megfelelő termikus impedancia helyezkedik el [19], [20], [21], [25]. Így a termikus analízisben az elektromos hálózatok szimulációjára kidolgozott számítógép-programok jól felhasználhatók.

A következőkben a 2. részben tárgyalt nagybonyolultságú mikroelektronikai eszközök és áramkörök konstrukciós jellemzőit figyelembe vevő általános termikus modell alapján kidolgozott szimulációs számítási módszert mutatunk be. Ez a módszer az elemi közelítő termikus modelleken alapszik. Itt csak a stacionárius állapot szimulációjához szükséges modell megadására szorítkozunk, tekintettel arra, hogy ez a gyakorlati feladatok esetén a leglényegesebb kérdés. Az elemi hőmodelleket „építőkockák”-ként kezeljük. Az eszköz, ill. áramkör termikus modelljét — növekvő sorszámú konstrukciós szintekkel jellemzett — építőkockákból építjük fel.

4. Elemi közelítő modellek

Az általános termikus modell minden hőforrásához két különböző irányú hűtést rendelhetünk (vízszintes és függőleges, l. az 1. ábrát), amelyeket az elemi hőmodellek alapján írhatunk le. Más szóval egy 3 dimenziós feladatot két részfeladatra bonthatunk: az egyik egydimenziós (függőleges irányú); a másik két-dimenziós (vízszintes irányú). Természetesen e felbontást nem lehet bármely feladatra alkalmazni. Meg kell jegyeznünk, hogy a mikroelektronikai eszközök és áramkörök konstrukciós sajátosságai ti. az



H 797-2

2. ábra. A csonkagúla hőmodellhez tartozó térfogatelem a : a hőforrás mérete [mm], h : a hordozó közeg vastagsága [mm], λ : a hordozó közeg hővezetési tényezője $\left[\frac{W}{mmK} \right]$, α : a szétterjedési szög

alapvetően síkbeli elrendezés) miatt ez a felbontás indokolt. Amennyiben helyes elemi modelleket választunk, akkor megfelelő pontosságú eredményeket érhetünk el.

Az alábbiakban először megadjuk az összes szóban forgó elemi modell termikus ellenállását. Az elemi modellek felosztása a hűtők és a hőforrás alakja szerint történik.

4.1. A csonkagúla hőmodell

Egy meghatározott méretű hőforrásból származó hőmennyiség igen nagy része egy meghatározott alakú hordozóközegdarabban terjed szét. Legyen a két-dimenziós feltételezett kiterjedésű és a hordozóközeg felületén elhelyezkedő hőforrás mérete: $a \times a$ (mm), ekkor az előbbi meghatározott hordozóközegdarab közelítőleg csonkagúlaként kezelhető (2. ábra). Ez a közelítés az irodalomban többször előfordul [10], [20], [16].

Ha λ konstans és a csonkagúla keresztmetszeti felületei (a hőforrás síkjával párhuzamos) izoterm felületek (ez a mikroelektronikai eszközök és áramkörök hordozói esetén feltételezhető), akkor a 2. ábrán levő alakzat termikus ellenállása egyszerűen számítható:

$$R_T = \frac{1}{\lambda} \int_0^h \frac{dx}{A(x)}, \quad (4)$$

ahol

$$A(x) = (a + 2x \operatorname{tg} \alpha)^2,$$

tehát

$$R_T = \frac{h}{\lambda a(a + 2h \operatorname{tg} \alpha)}. \quad (5)$$

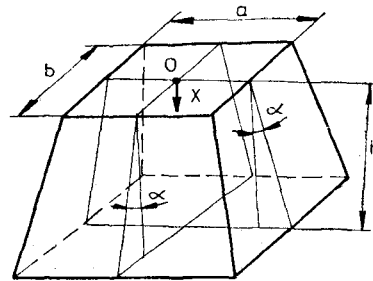
Az α -szög meghatározására a későbbiekben kerül sor.

4.2. Az elfajuló csonkagúla hőmodell

A hőmodell a 3. ábrán látható. A hőforrás mérete: $a \times b$, [mm]. A többi feltétel azonos a 4.1. pontbeli feltételekkel.

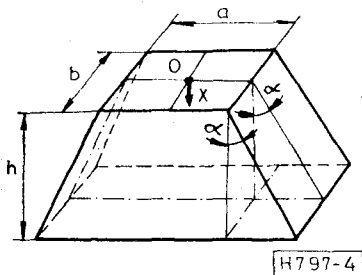
A termikus ellenállás (4) alapján számítható:

$$R_T = \frac{1}{\lambda} \int_0^h \frac{dx}{A(x)} = \frac{1}{2\lambda(a-b) \operatorname{tg} \alpha} \ln \frac{a(2h \operatorname{tg} \alpha + b)}{b(2h \operatorname{tg} \alpha + a)} \quad (6)$$



H 797-3

3. ábra. Az elfajuló csonkagúla hőmodellhez tartozó térfogatelem



H797-4

4. ábra. Az egyenlőszárú trapézszelét hőmodellhez tartozó térfogatelem

felhasználva, hogy

$$A(x) = (a + 2x \operatorname{tg} \alpha) \cdot (b + 2x \operatorname{tg} \alpha), \quad \text{és} \quad \alpha > 0,$$

$$\left(\alpha = 0 \text{ esetén } R_T = \frac{h}{\lambda \cdot a \cdot b} \right).$$

4.3. Egyenlőszárú trapézszelét hőmodell

A modellt a 4. ábra mutatja. Ebben az esetben csak az $A(x)$ függvény különbözik a 4.2. pontbeli viszonyoktól:

$$A(x) = b \cdot (2x \operatorname{tg} \alpha + a) \quad \text{és} \quad \alpha > 0.$$

A termikus ellenállás:

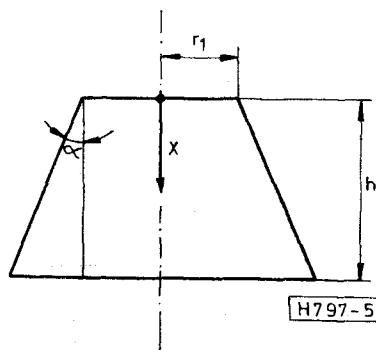
$$R_T = \frac{1}{\lambda} \int_0^h \frac{dx}{A(x)} = \frac{1}{2\lambda \cdot b \cdot \operatorname{tg} \alpha} \ln \left[1 + \frac{2h \cdot \operatorname{tg} \alpha}{a} \right]. \quad (7)$$

4.4. A csonkakúp hőmodell

A gyakorlatban sok esetben a hőforrások korong alakúaknak tételezhetők fel, ezért a termikus ellenállás a csonkakúp modell alapján számítható (l. az 5. ábrát).

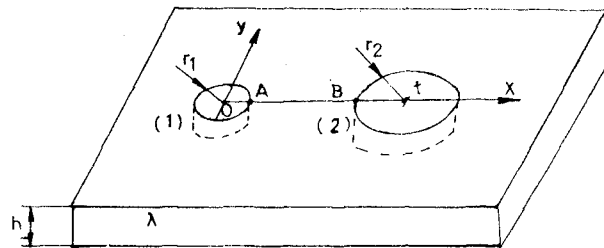
Legyen a hőforrás r_1 sugarú kör alakú, a hordozó vastagsága: h és hővezetési tényezője: λ . A termikus ellenállás:

$$R_T = \frac{1}{\lambda} \int_0^h \frac{dx}{A(x)} = \frac{h}{\pi \cdot \lambda \cdot r_1 (r_1 + h \cdot \operatorname{tg} \alpha)} \quad (8)$$



H797-5

5. ábra. A csonkakúp hőmodellhez tartozó térfogatelem keresztmetszete



H797-6

6. ábra. A hőforrások közötti hőút modelljéhez tartozó geometriai elrendezés

felhasználtuk, hogy

$$A(x) = \pi (r_1 + x \operatorname{tg} \alpha)^2.$$

4.5. A hőforrások közötti hőút modellje (hőcsatolási modell)

Az egyes rétegeken belül a következő modell a csatolási termikus ellenállás számítására alkalmazható. A modellt a 6. ábra mutatja.

A számítás egyszerűsítése kedvéért az (1.)- és (2.)-hőforrásokat kör alakúaknak tekintjük. Ekkor fennáll a következő ekvivalenciaösszefüggés:

$$a \times b = \pi r^2 \quad (9)$$

ahol a , b : a négyzetes hőforrás méretei,
 r : az ekvivalens hőforrás sugara.

Legyen egy nagy kiterjedésű, de véges vastagságú (h) hordozólapon két különböző sugarú (r_1 és r_2) kör alakú hőforrás, középpontjaikkal egymástól t -távolságban. Az origóban levő (1.)-hőforrás hőmérséklete állandó: T_1 . A második hőforrás (2.) az $(x=t, y=0)$ pontban van és hőmérséklete szintén állandó: T_2 . Tételezzük fel, hogy Φ hőáram a környezetből (1.)-be és (2.)-ből a környezetbe folyik, és más áramlás nincs. Most határozzuk meg a két hőforrás közötti (pontosabban két különböző izoterm felülettel rendelkező korong alakú test közötti) termikus ellenállást.

Az (1.)-forrás környezetében, annak hatására a hőmérséklet a következő függvény szerint változik a hordozón [20], [22]:

$$T_1(x, y) = T_1 - \frac{\Phi}{2\pi \cdot \lambda \cdot h} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r_1}. \quad (10)$$

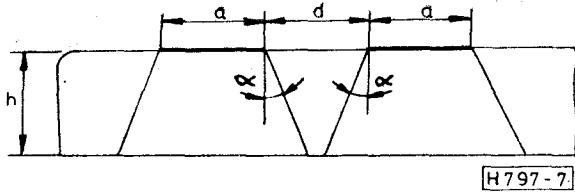
Hasonlóan a (2.)-forrás környezetében, annak hatására a hőmérséklet helyfüggése a hordozón az alábbi:

$$T_2(x, y) = T_2 + \frac{\Phi}{2\pi \cdot \lambda \cdot h} \ln \frac{\sqrt{(x-t)^2 + y^2}}{r_2}. \quad (11)$$

(Itt Φ iránya ellentétes és a (2.)-forrás helykoordinátái: $x=t, y=0$.)

A (10) és (11) segítségével a két forrás perempontjának hőmérséklete (T_A és T_B) számítható:

$$T_A = T_1 + T_2(x, y) \Big|_{x=r_1, y=0} = T_1 + T_2 + \frac{\Phi}{2\pi \lambda h} \ln \frac{t-r_1}{r_2}, \quad (12)$$



7. ábra. A szomszédos hőforrások közötti távolság és a szétterjedési szög összefüggésének becsléséhez

és

$$T_B = T_2 + T_1(x = t - r_2; y = 0) = T_2 + T_1 - \frac{\Phi}{2\pi\lambda h} \ln \frac{t - r_2}{r_1} \quad (13)$$

Ezek után a csatolási termikus ellenállás (12) és (13) alapján számítható:

$$R_T = \frac{T_A - T_B}{\Phi} = \frac{1}{2\pi \cdot \lambda \cdot h} \ln \frac{(t - r_1)(t - r_2)}{r_1 \cdot r_2} \quad (14)$$

4.6. A szétterjedési szög (α) becslése

Az α -szög fontos paraméterként szerepel az (5), (6), (7) és (8) összefüggésben. E szög meghatározása egzakt módon nagyon nehéz.

A gyakorlatban α értékét egyes konkrét esetekben kísérleti úton határozzák meg. Pontosabb érték hiányában általában $\alpha = 45^\circ$ -ot szoktak alkalmazni. Ez elég durva közelítés, viszont a számítás egyszerűsíthető [20], [16]. Az α -szög jobb közelítésű megválasztása elsősorban a vizsgálandó modell geometriai paramétereitől függ.

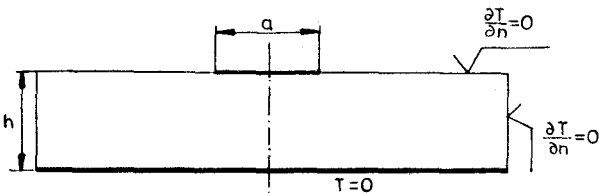
Az első kikötés a szomszédos források közötti távolságból adódik (7. ábra): szükséges, hogy

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{d}{2h} \quad (15)$$

legyen, ahol d a két szomszédos forrás közötti távolság, h a hordozó vastagsága.

(Pl. $d = 2h$ esetén $\alpha_{\max} = 45^\circ$.)

A gyakorlatban számos technológiai és tervezési



A hordozó: Al_2O_3

$h = 0,8$ [mm]

$\lambda = 0,035$ $\left[\frac{\text{W}}{\text{mm} \cdot \text{K}}\right]$; [28]

A hőforrás mérete: $a \times a$ [mm²]

H 797-8

8. ábra. A szétterjedési szög becslésénél alkalmazott elrendezés.

szempontra miatt két hőforrás nem kerülhet nagyon közel egymáshoz, ezért a (15) feltétel általában teljesül.

Másik fontos paraméter az α -szög megválasztásának szempontjából a hőforrás mérete a hordozó vastagságához viszonyítva. Ezzel kapcsolatban néhány kísérletet végeztünk. A vizsgált elrendezést a 8. ábra mutatja.

Tegyük fel, hogy egy nagy méretű, 0,8 mm vastagságú kerámia hordozón egy $a \times a$ [mm] méretű hőforrás van. A hordozó alsó felülete hűtőtömbhöz van ragasztva, így az alsó felület hőmérséklete gyakorlatilag közel azonos a környezetével, amelyet 0-nak tételeztünk fel. A hordozó többi felülete legyen adiabátikus, azaz a felületeken a hőmérsékletgradiens normális komponense nulla. A forrás hőteljesítménye legyen a vizsgált példában: 1,2 W. 6 tipikus esetet vizsgáltunk, ezekben rendre $a = 0,1; 0,4; 0,8; 1,6; 4; 6$ [mm] a hőforrás mérete. A hővezetési parciális differenciálegyenletet a véges differenciák módszerével megoldó EMFIELD numerikus matematikai programrendszer [26] segítségével meghatároztuk a fenti elrendezés hőmérsékleteloszlását és az izotermákat grafikusán is megjelenítettük.

A 9. ábra (9a; b; c) bemutatja az izotermákat abban az esetben, amelyben feltételeztük, hogy a hordozó állandó teljesítménysűrűségű, különböző méretű hőforrásokat tartalmaz. A 9d ábra szemlélteti az állandó hőmérsékletűnek feltételezett elrendezés izotermvonalait (pontosabban az izotermfelületek metszeit).

Az izotermák képéből arra a következtetésre juthatunk, hogy minél nagyobb a hőforrás mérete a hordozó vastagságához (vagyis a hőút hosszához) viszonyítva, annál inkább érvényes az a — 4.1...4.4. pontokban használt — feltételezés, amely szerint az izoterm felületek a hőáram túlnyomó részében párhuzamosak a hőforrás síkjával (vö. $A(x)$ a 4.1...4.4. pontokban). Számszerűsítve, jó közelítéssel azt mondhatjuk, hogy ha

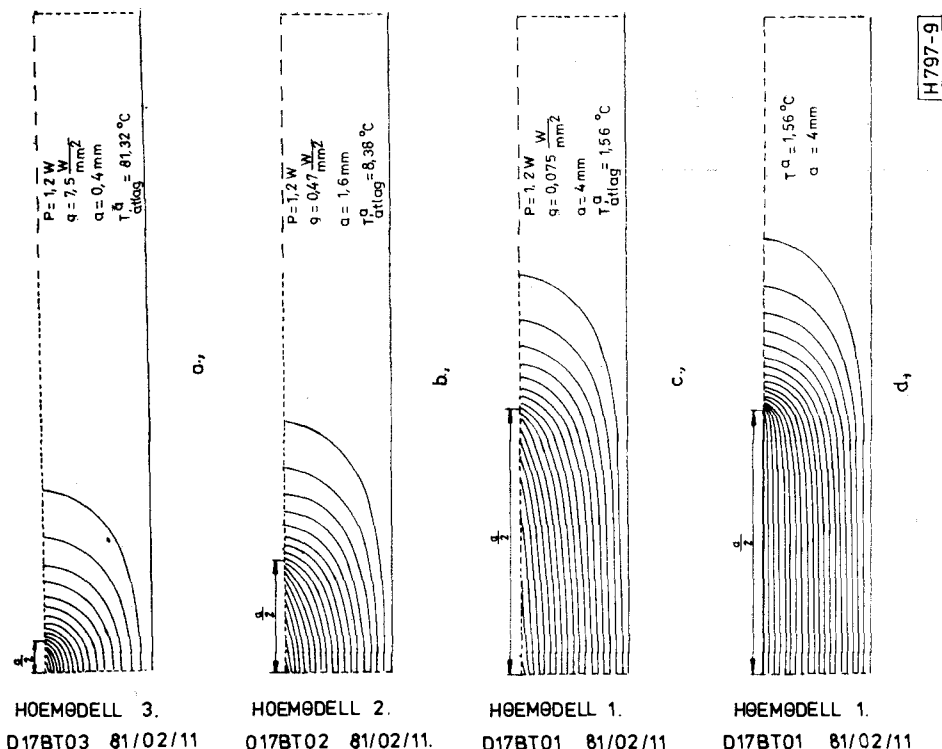
$$\frac{a}{h} \cong \frac{1}{2} \quad (16)$$

fennáll, akkor $A(x)$ izoterm felületnek tekinthető.

Ennél kisebb $\frac{a}{h}$ értékek esetén az izoterm felületek képe közeledik a pontszerű forrás teréhez (l. a 9a ábrát). Az utóbbi számítására közismert módszerek alkalmazhatók.

Általában a mikroelektronikai eszközökben és áramkörökben a (16) feltétel fennáll, mivel a hőtermelő területek méretei összemérhetők a hordozó vastagságával, sőt legtöbb esetben nagyobbak mint a hordozó vastagsága.

Az izotermák számítási adatok alapján számítottuk a 8. ábrán levő elrendezés termikus ellenállását különböző $\frac{a}{h}$ -értékek esetére. Összehasonlítva ezeket az eredményeket a (7) képlet alapján számolható termikus ellenállás eredményeivel ($a = b$ esetre), egy $\alpha = \alpha\left(\frac{a}{h}\right)$ görbe javasolható jó közelítésként (l. 10. ábrát). Megjegyzendő, hogy α értéke a tapasztalatok



9. ábra. Az állandó teljesítménysűrűségű hőforrást tartalmazó hordozó-elrendez és izoterm felületeinek metszete

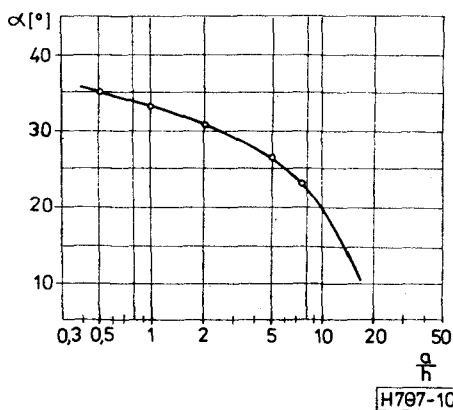
szerint csak $\frac{a}{h}$ értékétől függ és a tett feltételek mellett nem függ az anyagállandóktól.

5. A számítási módszer használata

Az elemi termikus modellek ismertetése után vázoljuk fel a termikus analízis egy lehetséges módszerét.

A bemenő adatok a következők:

- Az eszköz, ill. az áramkör geometriai paramétereit.
- Az alkalmazott anyagok hőjellemezője (λ).



10 ábra. A szétterjedési szög a geometriai jellemzők függvényében

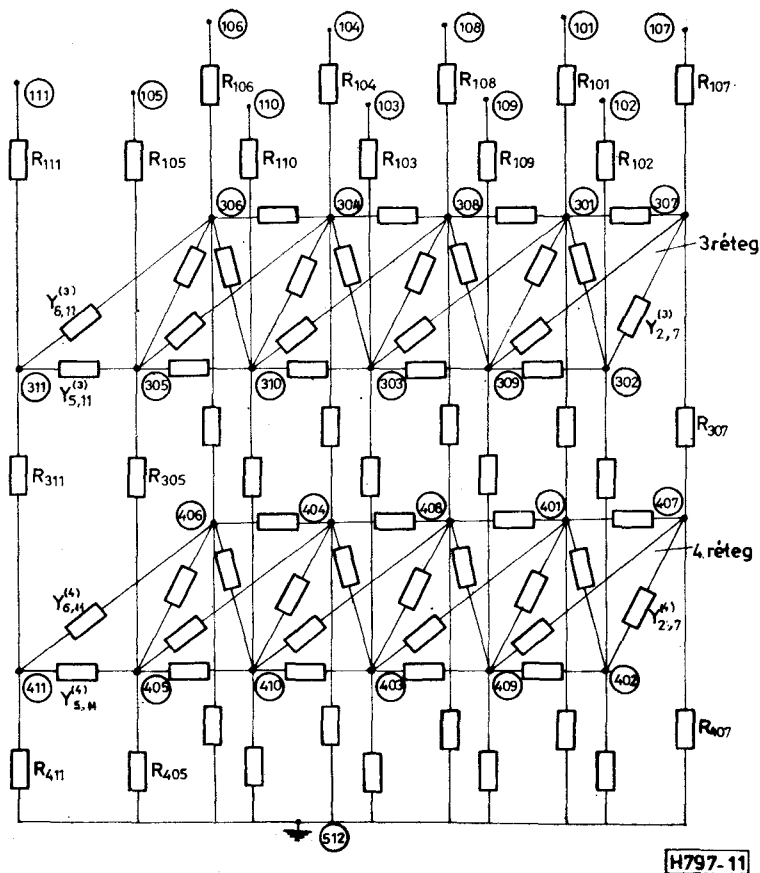
- A környezet hőparamétereit (T , α).
- A hőforrások méretei, disszipációteljesítményei.

A számítási lépések:

1. Minden forráshoz egy csomópontot rendelünk, és ezekre egy-egy független áramgenerátort kötünk (ha a forrás hőmérséklete adott, akkor független feszültséggenerátort alkalmazunk). Az áramgenerátorok a hőforrások hőáramát, a feszültséggenerátorok a hőforrások hőmérsékletét reprezentálják a termikus-elektromos ekvivalenciának megfelelően. A vizsgált eszköz, ill. áramkör struktúra további — termikus szempontból jellemző — térbeli pontjaiban további csomópontokat veszünk fel; az így kialakult térbeli csomóponthálózat pontjai általában a hőforrásokból, valamint az ezek alatt az egyes — termikus paramétereikben eltérő — hordozó és egyéb technológiai rétegek középsíkjaiban elhelyezkedő pontokból adódnak (1. majd példaként a 11. ábrát). Hőmérsékleti referenciapontnak a környezeti hőmérsékletet, ill. az ezt reprezentáló szimbolikus csomópontot célszerű tekinteni.

2. Minden csomópontpár között meghatározzuk a termikus ellenállásokat (ill. konduktanciákat) a különböző elemi modellekkel, és pedig:

- Ha $a=b$ vagy $a \approx b$, akkor az (5) összefüggés alapján (a , b a hőforrás méretei).
- Ha $a \neq b$, akkor a (6) összefüggéssel, de ha $a \gg b$ akkor az elrendezést célszerű több alakra bontani, majd a (7)-tel számolhatunk. Ez a kikötés szükséges a csatolási termikus ellenállás számításához.



11. ábra. A memória áramkör termikus helyettesítő hálózata

- Ha a hőforrás kör alakú, akkor (8) alapján számolunk.
- A csatolási termikus ellenállás számítása a (14) szerint történik (csak az egyes technológiai rétegeken belül, elsősorban a közeli csomópontokra vonatkozóan, nem szükséges minden csomópontpár között a csatolási ellenállást számítani).

3. Bármilyen lineáris DC analízis végrehajtására alkalmas programrendszer futtatása: a kapott hálózat szimulációjának végrehajtása.

4. Kimenő eredmény: a kijelölt csomópontok hőmérséklete. A termikus szimuláció ilyen megvalósításának lényeges tulajdonsága, hogy a vizsgált struktúra belső csomópontjainak hőmérséklete is meghatározható (olyan belső hőmérsékletértékek tehát, amelyek mérési módszerekkel nem határozhatók meg!).

Az előbbieken egy viszonylag egyszerű, áttekinthető termikus analízis módszert ismertettünk, amely egyaránt alkalmazható a

- Félvezető chip (1. szint).
- Hibrid IC (2. szint).
- Nyomatott áramkör (3. szint), egyenként vagy együttes formában történő termikus szimulációjára.

Ami a számítási időt illeti, az ismertett eljárás a gyors módszerek közé tartozik. Emellett lényeges

előnye, hogy nem igényel speciális programokat, és a vázolt feltételek mellett jó eredményt szolgáltat (l. a 6. pontot).

Meg kell jegyeznünk, hogy a konvekciós és sugárzási hőtadást is figyelembe tudjuk venni, mivel ezeknek megfelelő ekvivalens termikus ellenállásokat (R_c , R_r) köthetünk a megfelelő csomópontokhoz. Ezek legegyszerűbb közelítéseit l. pl. [5], [24]-ben.

Figyelembe tudjuk venni a hordozón realizált vezetők termikus hatását is. Ezek modellezését egy későbbi cikkben ismertetjük.

6. Példa

Példaként tekintsünk egy memóriaegységet [10], amely 11 db disszipatív elemet (chipet) tartalmaz egy vastagréteg hibrid áramkörben. A chipék méretei, disszipációs teljesítményei és helykoordinátái az 1. táblázatban található. A memóriaegység geometriai paramétereit és hőjellemzőit a 2. táblázat ismerteti. A legalsó réteg (tok) alsó felületének hőmérsékletét 0-nak választjuk, az eredmények minden esetben ehhez a referenciaponthoz viszonyított hőmérséklet-különbséget jelentik. Az oldalfelületek és a felső felület (kivéve, ahol chipék vannak) adiabaticusak, mivel a konvekciós és sugárzási hőtadás elhanyagolható. A hőforrásokhoz 11 csomópontot rendelünk (101., 102., ..., 111.; l. a 11. ábrát), amelyekhez 11 db független áramgenerátor van kötve.

A memória áramkör alkatrészeinek adatai [10].

A 11 db chip típusa: 6 db memória meghajtó chip, 2 db dekóder chip és 3 db ellenállás chip.

A chip méretei (a , b), középpontjaik helykoordinátái (x , y) és teljesítményei (P):

Elem sorsz.	x (mm)	y (mm)	a (mm)	b (mm)	P (W)
1.	16,48	3,835	2,006	2,565	0,637
2.	20,243	8,356	2,006	2,565	0,637
3.	12,19	8,356	2,006	2,565	0,637
4.	8,483	3,835	2,006	2,565	0,637
5.	5,537	8,536	2,006	2,565	0,637
6.	4,32	3,355	2,006	2,565	0,637
7.	20,59	2,641	1,32	1,701	0,275
8.	12,59	2,463	1,371	1,905	0,242
9.	16,48	8,23	1,27	1,27	0,250
10.	8,94	8,23	1,27	1,27	0,250
11.	1,88	8,23	1,27	1,27	0,250

2. táblázat

Memória áramkör adatai [10].

A hordozó mérete: $L_1=22,86$ mm, $L_2=11,43$ mm.

A rétegek adatai:

Réteg sorszám.	$\lambda \left[\frac{W}{mm \cdot K} \right]$	vastagsága [mm]	megjegyzés
1.	0,0016	0,0508	epoxy-réteg
2.	0,00201	0,128	vastag-réteg
3.	0,0201	0,762	hordozó
4.	0,0167	0,511	kovar tok

A további csomópontok az egyes rétegek (l. 2. táblázat) középsíkjában, a chip középpontjai alatt levő térbeli pontoknak felelnek meg. A teljes hálózatból ($5 \times 11 + 1 = 56$ csomópont, $5 \times 11 + (4 \times 55) = 275$ termikus ellenállás) az egyszerűség kedvéért a chiphez tartozó csomópontok mellett csak a két utolsó réteg csomópontjait, valamint a referenciacsomópontot vettük figyelembe (az 1. és 2. rétegbeli csatolási termikus ellenállások hatását nem vettük figyelembe, mivel ezek több nagyságrenddel nagyobbak a függőleges irányú termikus ellenállásoknál). Ez, mint látni fogjuk, jó közelítést eredményez.

Az egyszerűsített termikus ellenállás-hálózatot a 11. ábra mutatja (34 csomópont és 79 hőellenállás). A termikus ellenállásokat az (5), (6) és (14) összefüggések és a 10. ábrán levő görbe (szétterjedési szög meghatározása) alapján számítottuk.

A szimulációs feladatot a Távközlési Kutató Intézet ANAL-11 programjával [27] oldottuk meg R-30 számítógépen.

Az eredmény (minden csomópontoz tartozó hőmérséklet) a 3. táblázatban található.

A program által kapott eredmény jól közelíti a [10]-ben közölt, az infravörös mikroszkóppal mért eredményt (l. a 3. táblázatban).

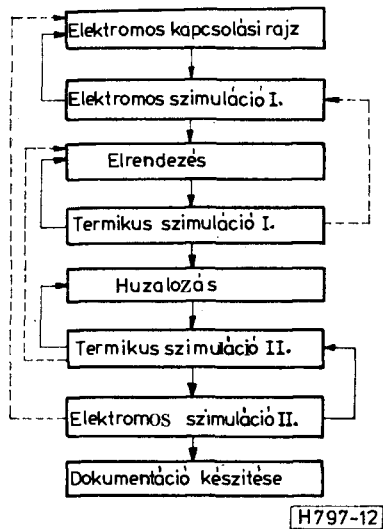
Megjegyzendő, hogy a számított értékek a csomópontok hőmérsékletét — azaz a chip átlaghőmérsékletét — mutatják, ezért kissé eltérnek a mért értéktől.

Csomópont sorszáma	Számított eredmény [°C]	Mért eredmény [°C] [10]
101	16,97	18
102	17,04	18
103	17,04	18
104	17,06	18
105	17,12	18
106	17,12	18
107	16,36	17
108	13,02	13
109	20,46	24
110	20,55	24
111	20,62	24
301	3,12	
302	3,19	
303	3,18	
304	3,21	
305	3,27	
306	3,26	
307	2,81	
308	2,74	
309	3,15	
310	3,23	
311	3,30	
401	0,78	
402	0,81	
403	0,79	
404	0,81	
405	0,82	
406	0,83	
407	0,68	
408	0,68	
409	0,71	
410	0,76	
411	0,73	

7. A termikus analízis szerepe és helye egy komplex tervező rendszerben

Ahhoz, hogy egy eszköz, áramkör vagy berendezés helyesen működjék, nagyon fontos, hogy az elektromos és termikus tervezés már a tervezési folyamat kezdetén párhuzamosan folyjék. A növekvő szerelési sűrűségéből és működési sebességéből adódó egyre nagyobb disszipációsűrűségek miatt a termikus tervezés egyre fontosabb lépéssé válik az áramkörök konstrukciós tervezésében.

A termikus effektusokat figyelembe vevő tervezés és ezen belül az együttes elektromos-termikus szimuláció általában csak iteratív úton valósítható meg. Bizonyos esetben azonban (elsősorban az 1. szintnél, azaz a félvezető chip esetén) szimulán iterációs úton, tehát együttes elektromos-termikus szimulációval lehet és célszerű megoldani az elektromos és termikus változókra vonatkozó egyenleteket [23]. Az első konstrukciós szintnél ugyanis a hőátadó közeg (Si) képes mind az elektromos áram (töltés) mind hőáram (energia) hatékony továbbítására, ezért a [23]-ban közölt módszer jól alkalmazható. A második szinttől kezdve (HIC-hordozón és nyomtatott lapon) azonban külön kell vizsgálni a termikus viszonyokat, majd ennek alapján az újra meghatározott elektromos modellparaméterekkel új elektromos szimulációt kell végrehajtani, ami új elektromos munkapontokat, tehát új disszipációs értékeket eredményez. Ezekkel újabb termikus szimuláció végezhető el stb. Az így — iteratív úton elvégzett — szimuláció



12. ábra. A termikus analízis helye és szerepe az áramkörök tervezési folyamatában

alapján, szükség esetén az áramkör elektromos és konstrukciós modelljének módosítására is sor kerülhet.

A termikus analízisnek egy komplex tervező rendszerben betöltött szerepét és helyét az előbbieket alapján a 12. ábra blokk-sémája mutatja. A blokk-sémában a „Termikus szimuláció I” fázis közelítő (és a huzalozás hatását természetesen figyelmen kívül hagyó) termikus modellekkel a durva termikus problémákat már kiszűri, a „Termikus szimuláció II” fázis pontosabb és teljesebb termikus modelljei pedig a kisebb súlyú, de az áramkör helyes viselkedését még meghatározó káros hőeffektusok felismerését segítik. A 12. ábra egyes tervezési fázisai (blokkjai) közötti visszacsatolások egyrészt az iteratív termikus-elektromos szimuláció sorozatot (jobb oldali visszacsatoló nyilak), másrészt a felismert termikus problémák következtében esetleg szükségessé váló elektromos, ill. konstrukciós modellmódosításokat (bal oldali visszacsatoló nyilak) jelölik. A folytonos vonallal jelölt visszacsatoló nyilak a gyakrabban alkalmazott visszacsatolásokra, a szaggatott vonallal jelölt visszacsatoló nyilak a ritkábban alkalmazott visszacsatolásokra utalnak. A blokk-séma természetesen csak vázlatos jellegű és nem tartalmaz egyes olyan részleteket, mint pl. a parazita (nemkívánatos elektromos) effektusok figyelembevételét szolgáló szimuláció, melynek a tervezési folyamatba való beépítése hasonló a termikus szimulációéhoz.

Megjegyzendő, hogy az elektromos és az egyéb konstrukciós modellekhez hasonló a gyakrabban előforduló konstrukciós részletek termikus modelljei is adattárban tárolhatók.

8. Összefoglalás

A nagybonyolultságú mikroelektronikai eszközök és elektronikai áramkörök konstrukciós jellemzőit elemelve, egy hierarchikus rendszerhez jutottunk, amely 3 konstrukciós szintet tartalmaz. Megmutat-

tuk, hogy minden szinten egy általános szintfüggetlen termikus modellt használtunk a termikus szimuláció során. Ez a modell olyan elemi termikus modellekből áll, amelyeket „építőkövek”-ként kezelhetünk. Az eszköz, ill. áramkör termikus modelljét – bonyolultságának megfelelő számú – „kövek”-kal (elemi modellekkel) építjük fel.

A bemutatott modellezési és szimulációs módszer jól alkalmazható a mikroelektronikai eszközök és elektronikai áramkörök termikus analízisére, de természetesen nem lehet alkalmazni bármely termikus feladatra. Bár az ismertetett modellezési és szimulációs eljárás közelítő jellegű, a tapasztalatok alapján a tervezési szempontokat tekintve kielégítő pontosságú termikus eredményeket szolgáltat. A módszer lényeges előnye, hogy jól illeszkedik egy komplex tervező rendszerbe; a modellek egyszerűek és adattárban tárolhatók; maga az analízis eljárás pedig megegyezik az elektromos szimuláció során alkalmazott lineáris DC analízis eljárással.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni mindazoknak a segítségét, akik a cikk létrejöttében közreműködtek. Köszönet illeti dr. Bálint Lajost értékes tanácsaiért és a vele folytatott konzultációkért, dr. Almássy Györgyöt értékes tanácsaiért, Radványi Andrást az analízisprogram futtatásában nyújtott segítségéért, Bérés Tibort az izotermák számításában nyújtott segítségéért.

I R O D A L O M

- [1] H. S. Blanks: The temperature dependence of component failure rate. *Microelectron. Reliab.* Vol. 20., pp. 297–307. 1980.
- [2] D. J. Kinniment—D. A. Edwards: Thermal design in a hybrid system with high packing density. *IEEE Trans. CHMT*, Vol. CHMT—1, No. 2. pp. 176–181. June 1978.
- [3] J. S. Prokop—D. W. Williams: Chip carriers as a means for high density packing. *IEEE Trans. CHMT*, Vol. CHMT—3, No. 3., pp. 297–304. Sept. 1978.
- [4] L. Bálint—L. Haslinger: The role of physical design, packaging and engineering design in integrated CAD-CAM-CAT systems in the electronics. *Proc. CONSTRONIC'80*, Budapest, 1980.
- [5] Almássy G.: *Elektronikai készülékek szerkesztése*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
- [6] H. S. Carslaw—J. C. Jaeger: *Conduction of heat in solids*. Clarendon Press. Oxford, 1959.
- [7] J. Ebrahimi: Analysis of thermal impedance for conventional and beam lead IC chips. *IEEE Trans. ED*, Vol. ED—18, No. 12, pp. 1139–1147. Dec. 1971.
- [8] A. G. Kokkas: Thermal analysis of multiple layer structures. *IEEE Trans. ED*, Vol. ED—21, No. 11, pp. 674–681. Nov. 1974.
- [9] W. Maly—A. P. Piotrowski: Heat exchange Optimization technique for high power hybrid IC's. *IEEE Trans. CHMT*, Vol. CHMT—2, No. 2, pp. 226–231. June. 1979.
- [10] R. F. David: Computerized thermal analysis of hybrid circuits. *IEEE Trans. PHP*, Vol. PHP—13, No. 3, pp. 283–290. Sept. 1977.

- [11] R. D. Lindsted—R. J. Surty: Steady state junction temperature of semiconductor chips. IEEE Trans. ED, Vol. ED—19, No. 1, pp. 41—44. Jan. 1972.
- [12] R. Castello—P. Antognetti: Integrated circuits thermal modeling. IEEE J. of Solid State Circuits, Vol. 13, No. 3, pp. 362—366. Jun. 1978.
- [13] N. Zommer—D. L. Feucht: Analytical thermal response of a multiple layer device under the semi-infinite approximation. IEEE Trans. ED, Vol. ED—25, No. 4, pp. 441—448. Apr. 1978.
- [14] A. A. Bilotti: Static temperature distribution in IC chips with isothermal heat sources. IEEE Trans. ED, Vol. ED—21, No. 3, pp. 217—226. March 1974.
- [15] G. N. Ellison: The thermal design of an LSI single chip package. IEEE Trans. PHP, Vol. PHP—12, No. 4, pp. 371—378. Dec. 1976.
- [16] V. W. Ruwe—T. D. Slagh: Thermal analysis considerations of hybrid microelectronic circuits. AMSMI Technical Report RG-76-11, Sept. 1975.
- [17] Z. Zdenek: Hibrid integrált áramkörök termikus analízise. CONSTRONIC'76, Budapest, 1976.
- [18] G. K. Baxter—J. W. Anslow: High temperature thermal characteristics of microelectronic packages. IEEE Trans. PHP, Vol. PHP—13, No. 4, pp. 385—390. Dec. 1977.
- [19] R. C. Buchanan—M. D. Reeber: Thermal considerations in the design of hybrid microelectronic packages. Solid State Tech. pp. 39—43. Febr. 1973.
- [20] K. B. Cook et. al.: Computer-Aided thermal analysis of a hybrid multistage active bandpass filter/amplifier. IEEE Trans. PHP, Vol. PHP—12, No. 4, pp. 344—350. Dec. 1976.
- [21] M. H. McLaughlin—N. D. Fitzroy: Thermal chip evaluation of IC packaging. IEEE Trans. PHP, Vol. PHP—8, No. 3, pp. 39—44. Sept. 1972.
- [22] S. Whitaker: Fundamental principles of heat transfer. Pergamon Press, New York, 1977.
- [23] Székely V.: Integrált áramkörök elektro-termikus jelenségeinek modellezése. Kandidátusi disszertáció, Budapest, 1977.
- [24] J. P. Holman: Heat transfer. McGraw-Hill Book Co., New York, 1972.
- [25] Imre L.: Műszaki hőtan és áramlástan. Tankönyvkiadó, Budapest, 1975.
- [26] Béres T.: A Laplace-egyenlet megoldása első-, másod- és harmadfajú peremfeltételek esetén számítógéppel. „Hírközlő rendszerek és berendezések” Ifjúsági konferencia kiadványa, Budapest, 1980.
- [27] Az ANAL—11 program felhasználói dokumentációja. Távközlési Kutató Intézet, Budapest, 1974.
- [28] C. A. Harper: Elektronikus szerkezetek konstrukciója és gyártása. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1972.