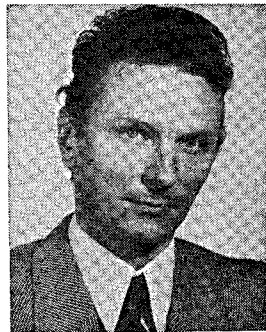


Félvezetőeszközök hőelvezetési viszonyait leíró termikus hálózat identifikációja

DR. SZÉKELY VLADIMIR—TRAN VAN BIEN
BME Elektronikus Eszközök Tanszék



ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk félvezetőeszközök hőelvezetési viszonyainak mérésével foglalkozik. A bemutatott mérési eljárás az eszköz időtartománybeli termikus válaszfüggvénye alapján identifikálja a hőelvezetés termikus RC hálózatát. A mérőrendszert számítógép vezérli, s a mért adatokból dekonvolúciós eljárással állítja elő a hőelvezetés időállandóinak spektrumát. Az identifikáció eredményeként adódó hőkapacitás — termikus ellenállás függvény a hőelvezetési struktúra egyes szakaszainak egyértelmű azonosítására is alkalmas.

Bevezetés

A félvezető eszközök teljesítőképességének egyik korlátja a disszipáció okozta melegedés. Ezért fontos konstrukciós szempont a hőelvezetés minél jobb megvalósítása. Szükséges továbbá, hogy pontosan mérni tudjuk a hőelvezetési viszonyokat: egyrészt azért, hogy az esetleges anomáliákat, gyártási gyenge pontokat kimutathatóvá tegyük, másrészt az eszköz pontos termikus modelljének meghatározása céljából. Utóbbi az igénybevehetőség határának megbízható megállapítása szempontjából lényeges.

A hőelvezetés vizsgálatának szokásos módszerei az irodalomból ismertek; itt csak egyes összefoglaló munkákra hivatkozunk [1], [2], [3], [4]. E módszerek elsősorban az eszköz (külső, ill. belső) hőellenállásának meghatározását célozzák, és nem adnak információt a hőátadási viszonyok részleteiről.

Cikkünkben egy olyan mérési eljárást ismertetünk, ami a lehető teljes részletességgel feltérképezi a félvezető eszköznek mind a stacionárius, mind a tranzienst hőelvezetését. A mérési eljárás kidolgozása során az alábbi célkitűzéseket tartottuk szem előtt:

- Olyan mérési módszert kívántunk kidolgozni, amellyel egyetlen mérési cikusból a hőelvezetés teljes időállandó tartományában nyerhetők az identifikációhoz szükséges adatok. Ezt azért emeljük külön ki, mert ez a mérés egyik problematikus pontja, hiszen a vizsgálandó időállandó tartomány 6—8 nagyságrendnyi! Például egy kisteljesítményű tranzisztor esetén a szilícium chip belső időállandói 100 μ s alattiak, a tok és a környezet közötti hőátadást viszont perces időállandók jellemzik.
- A mérési eredményekből automatikusan, számítógépes feldolgozással kívántuk előállítani a termikus helyettesítő hálózatot és a hőelvezetési viszonyokra jellemző egyéb diagramokat.

DR. SZÉKELY VLADIMÍR

A BME Villamosmérnöki Karán kitüntetéssel szerzett oklevelet 1964-ben. Egyetemi doktori disszertációját 1970-ben védte meg. Kandidátusi fokozatot 1978-ban szerzett, az integrált áramkörök elektro-termikus

jelenségei modellezésének témakörében. 1964 óta a BME Elektronikus Eszközök Tanszék oktatója; jelenleg docens, tanszékvezető-helyettes. Fő szakterületei: félvezetőeszközök működésének fizikája, számítógépes szimuláció, integrált áramkörök számítógéppel segített tervezése.

— A termikus helyettesítő hálózat struktúráját és részletességét úgy kívántuk megválasztani, hogy az identifikáció eredményeként kiadódó hálózat egyes szakaszai hozzárendelhető legyenek a valóságos tokozás-struktúra egyes zónáihoz. Ezzel a mérés a hőelvezetés „finomszerkezetének” feltárására is alkalmassá válik. Elkülöníthető a szilícium-chip, az állvány, a hűtőszelvény termikus viselkedése, lehetőség nyílt egyes anomáliák (pl. rossz felforrasztás) lokalizálására.

A mérés elve

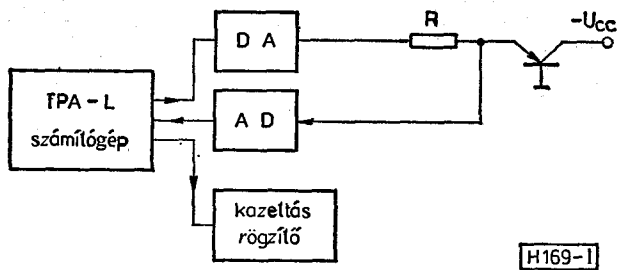
A tranzisztor hőelvezetési tulajdonságait az időtartományban, az átmeneti függvény felvételével mérjük. A $t=0$ időpillanatban az eszközön disszipált teljesítményt ugrásszerűen megváltoztatjuk, és ezután regisztráljuk az idő függvényében az eszköz aktív zónájának hőmérsékletváltozását. Utóbbi a bipoláris tranzisztor állandó emitteráram melletti U_{BE} feszültségének mérésével, közvetve mérjük. (Ismert tény, hogy e feszültség -2 mV/°C körüli, közel lineáris hőmérsékletfüggést mutat.)

A mérés gyakorlati megvalósítása

A mérési elrendezést az 1. ábrán vázoljuk. A mérést a TPA—L kisszámítógép vezérli. A számítógép egy-egy output, illetőleg input perifériavonalára 10 bites D/A, illetőleg A/D átalakító egység csatlakozik.

A D/A átalakítóval tudjuk a számítógépből vezérelten ugrásszerűen megváltoztatni a tranzisztor disszipációját. Ezzel adjuk tehát a lépésfüggvény gerjesztést a termikus átmeneti függvény felvételéhez. Ezen a helyen tulajdonképpen egy elektronikusan vezérelt kapcsoló is megfelelne. A D/A átalakítót csak annyiban használtuk ki, hogy segítségével programból is változtattuk a disszipáció-ugrás nagyságát.

Beérkezett: 1986. II. 5. (H)



1. ábra. A mérési elrendezés

Az A/D átalakító segítségével mértük a tranzisztor bázis-emitter feszültségét. Az átalakító legelső bitje 100 μV -nak felelt meg, átfogása 102,4 mV. Ez körülbelül 50 $^{\circ}\text{C}$ átfogást jelent, 0,05 $^{\circ}\text{C}$ felbontás mellett — ami az adott mérési feladathoz elegendő. Az átalakítási idő 20 μs volt. Ez ugyan egy kicsit sok, de a vezérlő számítógép viszonylag lassú volta miatt amúgy sem tudna kiszolgálni gyorsabb átalakítót. Emiatt a hőátadás legkisebb időállandójú részeinek pontos feltérképezéséről le kellett mondanunk.

A vezérlő program feladata: a mintavételezést és az A/D átalakítást indítani, az előző átalakítás eredményét beolvasni és a memóriában letenni — és az eddigieket ciklikusan ismételni. Ezt a programot természetesen assembly-szinten írtuk, mind azért, hogy az adott hardware-en elérhető legsűrűbb mintavétel valósítsuk meg, mind azért, hogy a mintavételek közötti időt a gépi utasítások ideje alapján pontosan számolni tudjuk. Így leggyorsabb mintavételként az alábbiakat tudtuk beállítani:

26 μs a teljesítmény átkapcsolástól az első mintavételig;

52 μs a további mintavételek között.

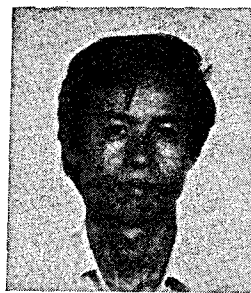
A nagy időállandók észlelése véget az átkapcsolástól körülbelül 1000 másodpercig folytattuk a mérést. A fenti mintavételi gyakoriság mellett ez $2 \cdot 10^7$ mérési adatot jelentene. Ilyen adattömeg tárolására lehetőség nincs — de szükség sem volt erre. Ahogyan telik a disszipáció átkapcsolástól számított idő, úgy lassul a hőmérséklet változása; a mintavételek közti idő tehát növelhető. A későbbiekben látni fogjuk, hogy a feldolgozás szempontjainak a logaritmikus időtengelyen egyenletes mintavétel felelne meg. Ezt közelítettük oly módon, hogy a mintavételi intervallumot 52 μs -ról indítva, hat lépésben egészen 1,775 s-ig növeljük. Ily módon mindössze 1700 mérési adattal feltérképezzük az átmeneti függvény 0–1000 s tartományát; úgy, hogy körülbelül 100 μs -tól 500 s-ig minden időállandó tartományban elegendő mérési adat áll rendelkezésünkre.

A mérési adatok feldolgozását ZX-SPECTRUM számítógépen végeztük. Ennek pusztán kényelmi okai voltak: nagyobb sebesség, kézzelzállobb grafikus lehetőségek. Ezért a mérési eredményeket az 1. ábra mérőrendszere SPECTRUM-formátumban kazetta-file-ra írja.

Az eredményfeldolgozás első lépése

Első lépésként a mért termikus átmeneti függvényt a

$$z = \ln t \quad (1)$$



TRAN VAN BIEN

Villamosmérnöki oklevelét a Budapesti Műszaki Egyetem

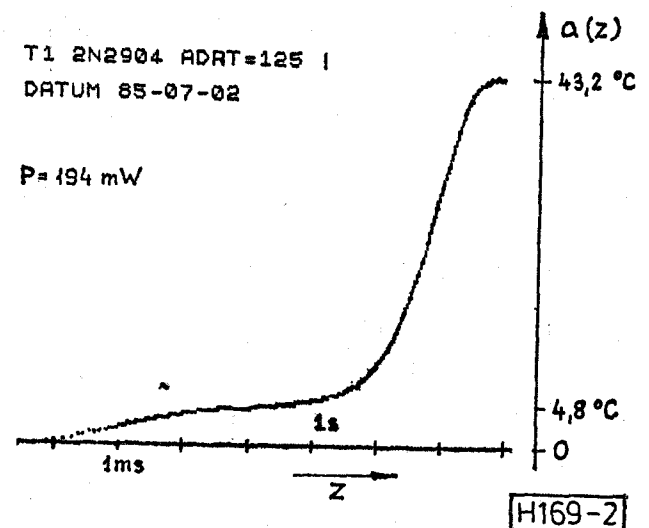
Elektroncsövek és Félvezetők Tanszékén szerezte, 1971-ben. 1972 és 1982 között hazájában, az Elektrotechnikai Kutató Intézetben dolgozott. Ebben az időszakban elektronikus mérőberendezések tervezésének és felépítésének témáival foglalkozott. 1982 és 1985 között a BME Elektronikus Eszközök Tanszékén dolgozott, aspiránsként. 1986-ban védte meg „Félvezető eszközök és integrált áramkörök hőelvezetési viszonyainak mérése” c. kandidátusi értekezését.

logaritmikus idő-tengelyre transzformáljuk. Az így kapott $a(z)$ függvényt látjuk a 2. ábrán, a 2N2904 tranzisztor mérési eredményeiből számolva. A változó gyakoriságú mintavételnek köszönhetően, a függvény minden szakaszán elegendő sűrűségben vannak mérési pontjaink, dacára az idő-tengely hét nagyságrend átfogásának.

Durva következtetéseket már ebből a diagramból levonhatunk [4]. A diagram bal és jobb oldali függvényértéke közötti hőmérséklet különbség 43,2 $^{\circ}\text{C}$. Ennyivel változik tehát a tranzisztor belső hőmérséklete az adott, esetünkben $P=194$ mW disszipációváltozás hatására. Ebből kiadódik az aktív zóna és a környezet közötti teljes hőellenállás:

$$R_{ja} = \frac{\Delta T}{\Delta P} = 222 \text{ }^{\circ}\text{C/W}. \quad (2)$$

Láthatjuk azt is, hogy az adott esetben a hőmérsékletváltozás két, határozottan elkülönülő lépcsőben következik be. Az első lépcső körülbelül 10 ms-ig tart, ez idő alatt a hőmérséklet 4,8 $^{\circ}\text{C}$ -al változik. Durván ez a szakasz azonosítható a belső hőellenállás hatásával: a szilícium-chip és az állvány kis hőkapacitású, kis termikus időállandójú zónájával. Eszerint a belső hőellenállás körülbelül $4,8/0,194 \approx 25 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$.



2. ábra. Termikus átmeneti függvény, logaritmikus időtengelyen ábrázolva

Ismét a 2. ábrát nézve, egy majdnem stagnáló szakasz után a hőmérséklet erőteljes megváltozását látjuk. Ez a 3 és 300 másodperc közötti tartományban történő változás a tok és a környezet közötti R_{ca} hőellenállásnak felel meg. Sebességét R_{ca} és a tok hőkapacitása határozza meg.

A függvény utolsó szakasza állandósult hőmérsékletre kell tartson. A mérésnél nagy körültekintésre van szükség ahhoz, hogy az eredmények ennek ne mondjanak ellent. Biztosítani kell ugyanis a környezetet állandó hőmérsékletűre, a mérés $0,05^\circ\text{C}$ felbontásának megfelelő pontossággal. A géptermi klímaberendezést például le kellett állítanunk a mérések idejére, mert be- és kikapcsolása a 2. ábra függvényének jobb oldali szakaszán jól látható, és a további feldolgozást zavaró hullámokat okozott.

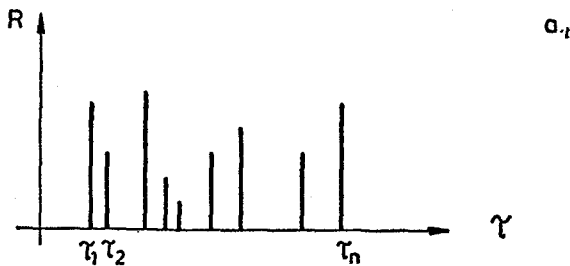
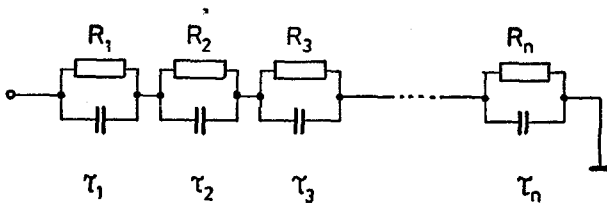
Az időállandó-sűrűség meghatározása

A tranzisztor környezet felé mutatott termikus impedanciáját egy termikus RC kétpólus írja le. Ha ez a kétpólus koncentrált paraméteres lenne, megadható volna a 3. ábra szerinti Foster-ekvivalenssel. Ez esetben az átmeneti függvényben előforduló időállandókat az egyes RC tagok időállandója adja, ezek „intenzitását” (tehát az eredő átmeneti függvényben való megjelenésük erősségét) az R érték. Az átmeneti függvény időállandóiból a 3.b. ábra szerinti vonalas spektrumot rajzolhatjuk. A teljes átmeneti függvényt az

$$a(t) = \sum_{i=1}^n R_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (3)$$

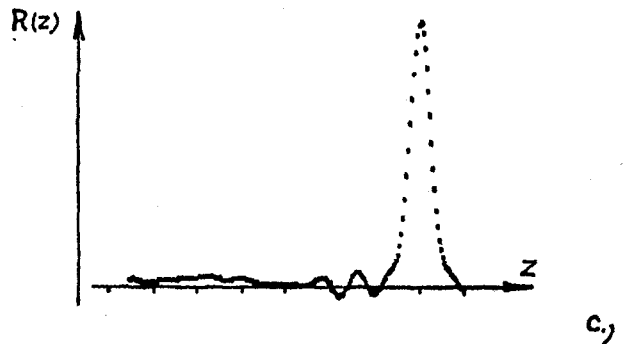
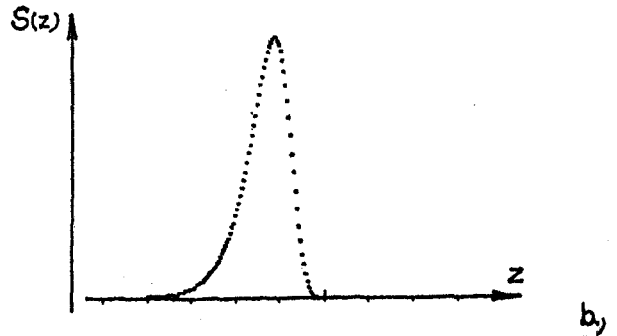
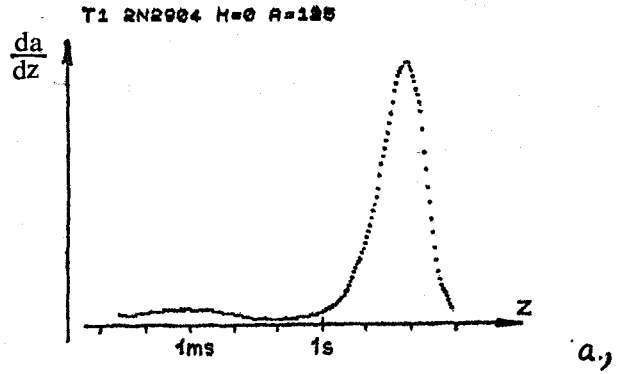
összeg adja.

Az a termikus RC hálózat, amelyen át a tranzisztor hőelvezetése történik, a valóságban elosztott paraméteres, hiszen mind a chip, mind az állvány, mind a hűtőszerezvény elosztott hőellenállást és hőkapacitást képvisel. Ennek a hálózatnak nincsenek a 3.b. ábra szerinti



H169-3

3. ábra. RC kétpólus Foster helyettesítőképe és időállandó spektruma



H169-4

4. ábra. Az időállandó sűrűség előállításuk dekonvolúcióval

diszkrét időállandói; az előforduló időállandók folytonos spektrumot alkotnak.

Definiáljuk az $R(z)$ *logaritmusos időállandó-sűrűség függvényét* az alábbi módon:

$$R(z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{z \text{ és } z + \Delta z \text{ közé eső időállandók intenzitása}}{\Delta z} \quad (4)$$

(z itt az (1) képlet szerint értelmezett logaritmusos idő-változó). Ezzel a valamely τ_A és τ_B közé eső időállandók intenzitása

$$\int_{\ln \tau_A}^{\ln \tau_B} R(z) dz \quad (5)$$

és a (3)-mal analóg módon írott átmeneti függvény

$$a(t) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\zeta) (1 - e^{-t/\zeta}) d\zeta \quad (6)$$

Újból felhasználva az (1) összefüggést

$$a(z) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\zeta)(1 - e^{-e^x - \zeta}) d\zeta \quad (7)$$

ami — jól láthatóan — egy konvolúciós típusú integrálegyenlet az ismeretlen időállandó-sűrűsége.

Deriváljuk a fenti integrálegyenletet z szerint!

$$\frac{d}{dz} a(z) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\zeta) e^x - \zeta - e^x - \zeta d\zeta \quad (8)$$

Definiáljuk most az $S(z)$ függvényt:

$$S(z) = e^x - e^z \quad (9)$$

Ezzel az előbbi összefüggés így alakul:

$$\frac{d}{dz} a(z) = R(z) * S(z) \quad (10)$$

ahol $*$ a konvolúció műveleti jele.

Ezzel el is jutottunk az időállandó-sűrűség meghatározásának módjához. Először a (10) egyenlet bal oldalát állítjuk elő, a logaritmikus idő-tengelyre transzformált $a(z)$ átmeneti függvény numerikus deriválásával. A 2. ábrán látható függvényből ez a derivált a 4.a. ábra szerint adódik. Ezt az időállandó-sűrűség függvény „elmosódott” másának tekinthetjük, mert a (10) egyenlet szerint abból az $S(z)$ -vel való konvolúcióval származik. A 4.b. ábrán az $S(z)$ függvényt is felrajzoltuk, azonos vízszintes lépték mellett. Rajzából képet alkothatunk arról, hogy milyen mértékben „mossa el” a tényleges időállandó eloszlást a $S(z)$ függvénnyel való konvolúció. Megállapíthatjuk, hogy $S(z)$ átlagos szélessége körülbelül 5 oktáv, a 4.a. ábra függvénye tehát egy ennek megfelelő, eléggé rossz felbontóképességgel leképezett, de már értékelhető mása az időállandó-sűrűségnek.

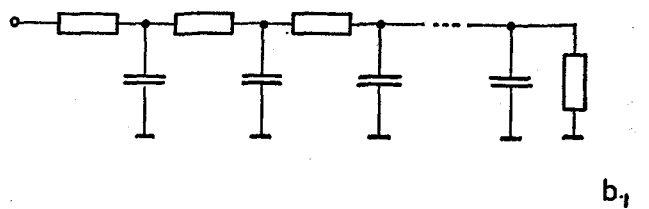
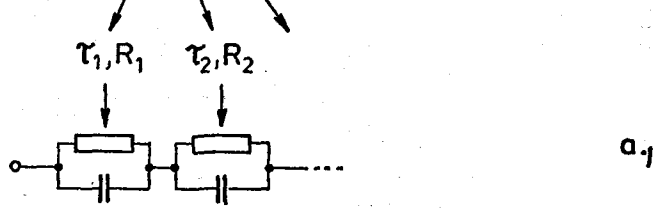
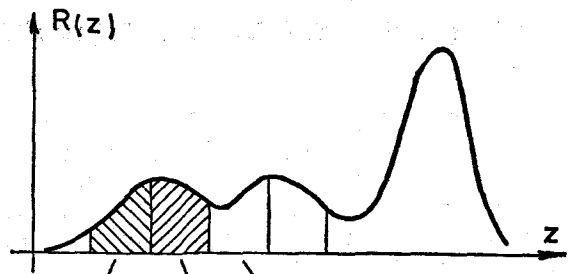
Ha a felbontóképességet növelni akarjuk, a (10) egyenletet meg kell oldanunk $R(z)$ -re. Más szóval: a konvolúció inverz műveletét, a *dekonvolúció*t kell elvégeznünk. A dekonvolúció műveletére az [5] forrásban adott algoritmust használtuk; a végrehajtás módját itt nem részletezzük.

Ismert tény, hogy a fenti jellegű problémák megoldása során a dekonvolúció folytán megsokszorozódik a mérési pontatlanságok hatása, „zajosabbá” válik az eredményfüggvény. Emiatt a dekonvolúcióval általában nem lehet teljes pontossággal visszaállítani a keresett függvényt, a felbontóképesség kisebb-nagyobb növekedése érhető csak el.

Esetünkben elfogadható pontosság mellett körülbelül 2,5-szörösen lehetett megnövelni a felbontást. A 4.a. ábra függvényét így továbbfeldolgozva, kaptuk a 4.c. ábrán látható időállandó sűrűséget. Észrevehetjük, hogy ez hasonlít a 4.a. ábra függvényéhez, de finomabb részletek is megfigyelhetővé váltak rajta. A felbontás most körülbelül 1,8 oktáv, ilyen pontossággal tudtuk tehát feltárni a hőelvezetés időállandóit.

Koncentrált RC helyettesítőképek

A termikus impedancia közelítő, koncentrált elemes RC helyettesítőképét a legegyszerűbben az alábbi mó-



H169-5

5. ábra. a) Közelítő Foster hálózat származtatása az időállandó sűrűségből. b) Cauer helyettesítő hálózat

don kapjuk. Felosztjuk a z logaritmikus idő-tengelyt egyenlő (például 1 oktávnyi) szakaszokra, és $R(z)$ ezen szakaszokhoz tartozó integráltját a szakasz közepére eső diszkrét időállandó intenzitásának tekintjük (5.a. ábra). Ezzel a 3.b. ábrán látható jellegű, közelítő vonalas spektrumra jutunk — aminek helyettesítő hálózata a 3.a. ábra szerinti, átmeneti függvényét a (3) képlet adja.

Az identifikáció feladatát ezzel tulajdonképpen el is végeztük, hiszen kaptunk egy olyan helyettesítő hálózatot, ami közelítőleg leírja a hőelvezető struktúra viselkedését. További megfontolásainkhoz, a helyettesítőkép szakaszai és a hőelvezető struktúra egyes zónái közötti megfeleltetéshez azonban ez a helyettesítő hálózat nem alkalmas. A hőterjedés jelenségeire ugyanis nem értelmezhető a hálózat két csomópontja közötti hőkapacitás. A hőkapacitás a helyettesítőképben mindig a föld felé kell megjelenjen. Ezért célszerűbb volna a helyettesítő hálózat 5.b. ábrán látható, létrakapcsolás jellegű formája (Cauer-féle normálalak).

Ugyanazon RC kétpólus Foster és Cauer alakja között az átszámítás módja ismert, elvileg problémát nem okoz. (Gyakorlati, numerikus problémák ugyan adódnak, ha 20—30 vagy még több tagból álló hálózatra végezzük az átszámítást, ennek tárgyalása azonban kívül esik a jelen cikk témáján.) Mindenestre: egy-egy, a 4.c. ábra szerinti időállandó sűrűséghez a közelítő létrahálózat elemértékei kiszámíthatók.

Megfeleltetés a fizikai struktúra és a helyettesítő hálózat között

Abban az esetben, ha a hőelvezetés egydimenziós problémaként tárgyalható, e létrahálózat egyes részei egyértelműen megfeleltethetők a fizikai struktúra egyes szakaszainak. Az „egydimenziós probléma” nem jelent túlságosan erős megszorítást, hiszen ebbe beletartozik a gömbszimmetrikus, a hengerszimmetrikus, a sík hőterjedés és közelítőleg ezek kombinációi is — a félvezető eszközök hőelvezető struktúrái e feltételeknek többnyire eléggé jól megfelelnek.

Egy egydimenziós struktúrára így írhatjuk fel a hővezetés differenciálegyenletét [6]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c(x)} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{r(x)} \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (11)$$

ahol $T(x, t)$ a helytől és időtől függő hőmérséklet eloszlás, $r(x)$ az egységnyi x hosszúságra eső termikus ellenállás, $c(x)$ az egységnyi hosszúságra eső hőkapacitás.

Az x helykoordináta értelmezése itt attól függ, hogy gömb- sík- stb. terjedésről vagy ezek kombinációról van-e szó. Célszerű ezért itt áttérni valami ívhossz-paraméter jellegű független változóra, ami jelen esetben a hőforrás és az x koordinátájú pont közötti teljes hőellenállás lehet. Jelöljük ezt $\varrho(x)$ -szel. Magától értetődően

$$r(x) = \frac{d\varrho}{dx} \quad (12)$$

és

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c(x)} \frac{d\varrho}{dx} \frac{\partial}{\partial \varrho} \left(\frac{1}{r(x)} \frac{d\varrho}{dx} \frac{\partial T}{\partial \varrho} \right) = \frac{r(x)}{c(x)} \frac{\partial^2 T}{\partial \varrho^2}. \quad (13)$$

Jelöljük most K -val az egységnyi hőellenállásra jutó hőkapacitást:

$$K(x) = \frac{c(x)}{r(x)}. \quad (14)$$

Ezzel

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{K} \frac{\partial^2 T}{\partial \varrho^2}. \quad (15)$$

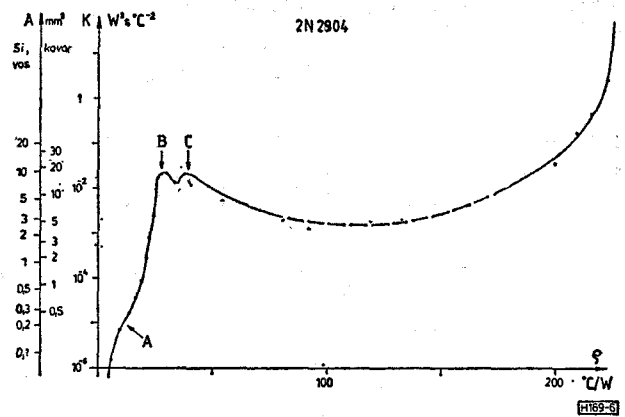
A K érték bármely hővezető anyagban arányos az anyag keresztmetszet négyzetével. Például szilíciumra, továbbá az állvány-anyagként gyakran használt vasra és kovar ötvözetre ([7] adatai alapján):

$$\begin{aligned} \text{szilícium} & K = 2,58 \cdot 10^8 A^2 \\ \text{vas} & K = 2,65 \cdot 10^8 A^2 \\ \text{kovar} & K = 0,7 \cdot 10^8 A^2 \end{aligned} \quad (16)$$

ahol A a keresztmetszeti felület.

Ábrázoljuk most a méréseink alapján a K értéket a hőforrástól számított hőellenállás függvényében. Ezt (közelítőleg) a létrahálózat helyettesítőkép alapján teheljük meg. A létrahálózat minden RC tagjára a C/R hányadost képezve, éppen a K közelítő értékét kapjuk meg. Tehát

$$K_n = \frac{C_n}{R_n}; \quad \varrho_n = \sum_{i=1}^n R_i. \quad (17)$$



6. ábra. A $K(\varrho)$ függvény a hűtőszerezvény nélküli 2N2904 tranzisztorra

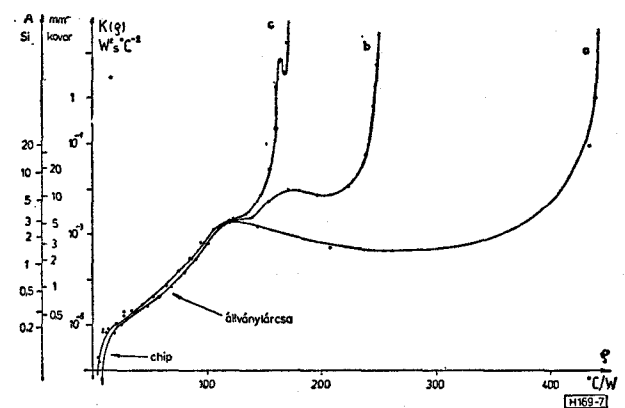
Az így előállított $K_n(\varrho_n)$ függvényt látjuk a 6. ábrán, az eddig is példaként tekintett tranzisztorra számolva, a K tengely logaritmikusság miatt.

Ez az ábra most már alkalmas arra, hogy a mérési eredményeken a struktúra egyes részeit azonosítsuk. A függőleges K tengely mellett további léptékeket tüntettünk fel: a hővezetés keresztmetszeti felületét szilíciumban, vasban és kovarban, a (16) összefüggések alapján. E léptékekből, a szilícium-chip $0,25 \text{ mm}^2$ keresztmetszetét figyelembe véve megállapíthatjuk, hogy a chipen belüli hővezetés körülbelül a függőleges tengely és az „A” pont közötti függvényszakasznak felel meg. A görbe „A” és „B” közötti szakasza az állványtárcsa radiális hővezetéséből származik (ezt a későbbiekben még igazoljuk). A „C”-vel jelölt maximumot valószínűleg a sapka hőkapacitása okozza. A függvény további része (amelyhez több, mint egy nagyságrenddel csökkenő hőkapacitás tartozik), a sapka és a környezet közötti konvekciós hőtáradást tükrözi.

A fentiekkel vázoltuk a kapott $K(\varrho)$ függvény és a fizikai struktúra közötti megfeleltetés lehetőségét. A kiértékelés finomabb módjait a következő szakaszban részletezzük.

Mérési példák és értékelésük

A 7. ábrán a 2N2906 tranzisztorra vonatkozó mérési eredményeket látunk. Ugyanazon tranzisztor-egyedet



7. ábra. A $K(\varrho)$ függvény a 2N2906 tranzisztorra, három különböző hűtési mód esetén

mértük le három különböző esetben: szabadon sze-
relve („a” görbe), a sapkára kb. 5 cm²-es hűtőzászlót
húzva („b” görbe) és a tranzisztort nagyobb, 45 cm²-es
hűtőfelülettel ellátva („c” görbe).

A három függvény az ábra bal oldalán, az $R_{th}=120$
°C/W alatti szakaszon gyakorlatilag egybe esik. Ezt
a függvényszakaszt a hűtőszerelvény léte és milyensége
nem befolyásolta — ez tehát nyilvánvalóan a sapkán
belüli hővezetésnek felel meg. Elemezzük először ezt
részletesebben.

A 2N2906 tranzisztor TO—18 tokozású. A tok
metszeti rajzát a 8.a. ábrán látjuk. A belső hővezetés
útja:

szilícium-chip → állványtárcsa → sapka.

Az üveg hővezetése elhanyagolható.

A 7. ábra függvényének első, meredeken emelkedő
szakasza a chippel azonosítható. E szakasz a szilí-
ciumra vonatkozó függőleges tengelyen kb. 0,2 mm²-
nél ér véget — ami jól összevág a 0,5×0,5 mm-es chip
0,25 mm² keresztmetszet adatával. Leolvashatjuk, hogy
a chip körülbelül 10—12 °C/W termikus ellenállást
képviseel.

A következő függvényszakasz a fél-logaritmikus
ábrázolásban körülbelül egyenesnek adódik; a kovar-

skalán 0,4—5 mm² keresztmetszet között fekszik.
A 8.a. ábrán adott méreteket tekintve, ez jól megfelel
a radiális hőterjedésű kovar állványtárcsának: utóbbi
hővezetési keresztmetszete a chipnél kb. 0,5 mm²,
a sapkánál 3,7 mm².

Az állványtárcsával történő megfeleltetést még egy
módon ellenőrizhetjük. Tárcsa radiális hővezetésére
bizonyítható, hogy a $K(\varrho)$ függvény

$$K(\varrho) = \text{const} \cdot e^{4\pi d \lambda} \quad (18)$$

— ahol d a tárcsa vastagsága, λ a fajlagos hővezetési
együtthatója. A fél-logaritmikus ábrázolásban a tár-
csának megfelelő függvényszakasz tehát egyenesként
jelenik meg.

Az egyenes dőléséből d értékét is meghatározhatjuk.
Az egyenes két pontjához tartozó K_1, ϱ_1 és K_2, ϱ_2
értékpárokból

$$d = \frac{\ln K_2/K_1}{4\pi\lambda(\varrho_2 - \varrho_1)} \quad (19)$$

A 7. ábrából, a kovar $\lambda=17$ W/m °C értékét figye-
lembe véve, $d=0,26$ mm adódik, ami igen közel van
az állványtárcsa tényleges 0,25 mm vastagságához.

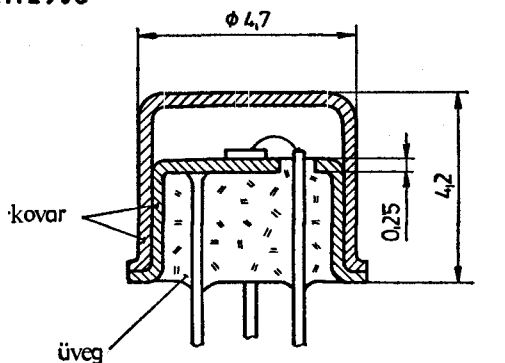
Végezzük el ezt a számítást a 6. ábra függvényére is!
Ha a kovar λ értékével számolunk, az állvány vas-
tagságára $d=3,7$ mm adódik. Ebből nyilvánvaló,
hogy az állványtárcsa más anyagból készült. Elektron-
sugaras mikroanalízissel megállapítottuk, hogy ennél
a tranzisztortípusnál az állványtárcsa tiszta vasból
van. Ennek fajlagos hővezetésével számolva, $d=0,88$
mm adódik, ami már nem tér el elfogadhatatlanul a
2N2904 típus tokjának geometriai adataitól (8.b. ábra).

Tekintsük most a 7. ábrán a jobb oldali, 120 °C/W
fölötti függvényszakaszokat! Az „a” görbe esetén a
tranzisztoron nincsen hűtőszerelvény. A ház és a kör-
nyezet között $440-120=320$ °C/W termikus ellen-
állás mutatkozik. Itt konvekciós hőátadásról van szó,
amihez kevés hőkapacitás tartozik. A mérés ezt is
tükrözi, hiszen 120 °C/W fölött az „a” görbe észre-
vehetően csökkenő értéket mutat. A „b” görbén vi-
szont 170 °C/W körül egy maximumot figyelhetünk
meg. Ezt a hűtőzászló hőkapacitása adja. A függvény
alapján a sapka és a hűtőzászló közötti átmeneti ellen-
állás 50 °C/W-ra becsülhető, a hűtőzászló és a környe-
zet közötti 80 °C/W-ra. A „c” görbe a nagyobb felü-
letű hűtőlemez esete. Megfigyelhetjük itt is a hűtő-
lemez hőkapacitása miatti maximumot. Az is látható,
hogy a hűtőlemez és a környezet közötti termikus
ellenállás most 10 °C/W alatti.

A 9. ábrán integrált áramköri tranzisztorokra vonat-
kozó mérési eredményeket mutatunk be. Két tranzisz-
tort mértünk: a MEVLINA—1 lineáris array áram-
körének kisáramú „s” és közepes áramú „m” npn
tranzisztorát. Az IC-chip műanyag dual-in-line tok-
ban volt.

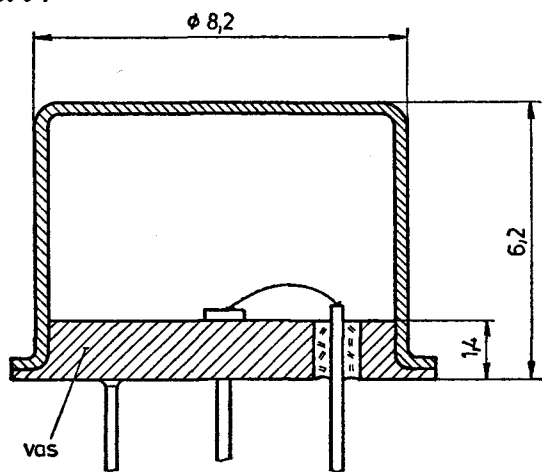
A függvény első ($R_{th} < 25$ °C/W) szakasza a szilí-
cium lapkában való hőterjedésnek felel meg. A lapká-
ban a hő laterálisan terjed, mert a Si fajlagos hőveze-
tési együtthatója nagyságrenddel jobb, mint a kovar
tartólemeze. Ebből a laterális terjedésből a (19) kép-
lettel az „s” tranzisztor esetére visszaszámolva a Si
lapka vastagságát, 0,54 mm adódik — ami nem áll
messze a tényleges, 0,4 mm körüli lapkavastagságtól.
Az „m” tranzisztor görbéjén a kezdeti meredekség

2N2906



a₁

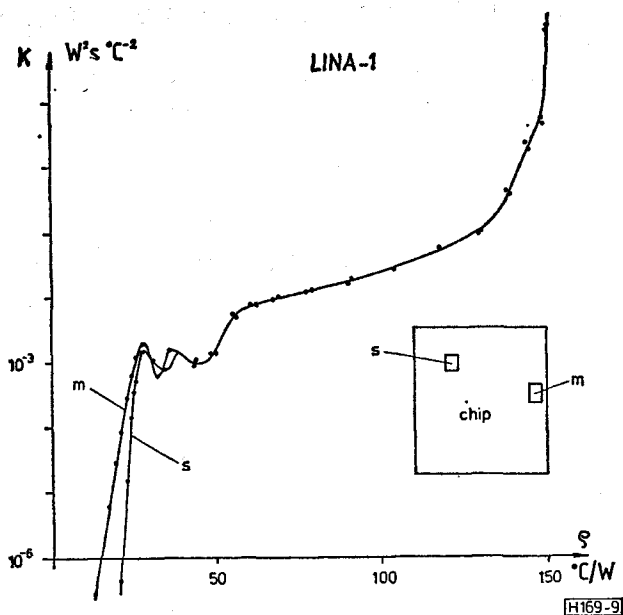
2N2904



b₁

H169-8

8. ábra. A tranzisztor-tokok vázlata



9. ábra. A LINA-1 lineáris array két tranzistorjának $K(\rho)$ függvénye (az „s” görbét 10 °C/W -al jobbra eltolva ábrázoltuk, hogy kitűnjön a görbék jobb oldali felének egybeesése)

kb. feleakkora. Ez az IC layout ismeretében válik érthetővé. Ugyanis az „s” tranzisztor körülbelül a chip közepén helyezkedik el, az „m” tranzisztor pedig a szélén. Ezért az „s” tranzisztor környezetében a laterális hőterjedés egy tárcsa radiális hővezetésének felel meg, a szélén fekvő „m” tranzisztornál pedig csak egy „fél-tárcsának”.

A 9. ábra függvényének 25 °C/W feletti szakaszát a műanyag ház és a beléöntött kivezetés-lábak bonyolult hővezetési viszonyai adják. Nem látunk e függvényen a konvekciós hőátadásra jellemző, kis kapacitású szakaszt — ami arra vall, hogy a dual-in-line tokból a hő jórészt vezetéssel, a lábakon át távozik.

*

A cikkünkben bemutatott identifikációs módszerrel egyéb, hasonló jellegű termikus problémák is vizsgálhatók. Elvégezhető például a különböző hűtőszerevények pontos minősítése, a konvekciós hőátadás ellenállásának és a tok-hűtőszerevény átmeneti ellenállásának az elkülönítése. Vizsgálható a szigetelőalapú integrált áramkörök hőelvezetési viszonyai. Hogy egy messzebb eső területet is említsünk: megállapíthatók e mérési módszerrel villamosgépek pontos termikus modell-hálózatai — aminek igen fontos szerepe van a korszerű motorvédelmi berendezésekben.

Eddigi munkánkban nem érintettük a termikus négypólusok identifikációját. Ez a feladat pedig szintén bír jelentőséggel: alapja lehet az integrált áramkörökben két elem között fellépő termikus csatolás pontos modellezésének. Várható, hogy a kétpólus-identifikáció ismertetett módszere erre a feladatra is továbbfejleszhető lesz.

E helyen szeretnénk köszönetünket kifejezni dr. Fetter Lászlónak (TKI) az elektronsugaras mikroanalízis vizsgálatok elvégzéséért, Méhn Mártonnak és Kővári Péternek (MEV) a LINA lineáris array áramkörre vonatkozó információkért.

IRODALOM

- [1] *Török Sándor*: Félvezetődészközök termikus jellemzőinek vizsgálási módszerei, egyetemi doktori értekezés, Budapest, 1980
- [2] *B. Reich*: Measurements of transistor thermal resistance, Proc, IRE, V. 46, pp. 1204—1207 (1968)
- [3] *Surguta László*: Tranzisztor belső hőellenállás mérő készülék, Híradástechnika, XVII. évf. 7. szám, pp. 215—221 (1966)
- [4] *B. S. Siegel*: Measuring thermal resistance is the key to a cool semiconductor, Electronics, 1978. júl. 6., pp. 121—126
- [5] *Székelly V.*: A dekonvolúció és mérés-technikai alkalmazási lehetőségei, III. Országos Elektronikus Műszer- és Mérés-technikai Konferencia kiadványa, Budapest, 1972. március 13—16, pp. 1—10
- [6] *H. S. Carslaw—J. C. Jaeger*: Conduction of heat in solids, Oxford, Clarendon Press, 2nd ed.
- [7] *K. Raznjevic*: Hőtechnikai táblázatok. Műszaki Könyvkiadó, 1964.
- [8] *Tran Van Bien*: Félvezető eszközök és integrált áramkörök hőelvezetési viszonyainak mérése, kandidátusi értekezés, Budapest, 1985.

**Lapunk példányonként megvásárolható:
az V., Váci utca 10. és
az V., Bajcsy-Zsilinky út 76. szám alatti
hírlapboltokban**