F. Jan
J. Zupan*
M. Horvat
D. Kolar

Iskra IEZE, Ljubljana
Institut "Jožef Stefan", Ljubljana
*Kemijski institut "Boris Kidrič", Ljubljana

# NUMERIČNA TERMIČNA ANALIZA DEBELOPLASTNEGA VEZJA

## UVOD

Z naraščanjem gostote moči v mikroelektronskih vezjih je potrebno, da že pri načrtovanju predvidemo temperaturno porazdelitev v vezju. Razporeditev energijskih izvorov in ponorov (pasivnih ali aktivnih komponent vezja), mora biti taka, da delavna temperatura v nobeni točki vezja ne presega neke predvidene, maksimalne vrednosti. Pravilno termično načrtovanje vezja namreč močno poveča njegovo zanesljivost. To kažeta tudi podatka, da se IV pri znižanju delavne temperature za 30°C poveča zanesljivost za faktor 2 ([1]), pri polprevodniških elementih pa bi znižanje delavne temperature od 175 na 25°C povečalo zanesljivost za faktor 600 ([2]).

## METODE TERMIČNE ANALIZE

Za termično analizo oz. termično načrtovanje debeloplastnega ali hibridnega vezja uporabljamo predvsem ([3])

- neposredne analitične,
- grafične,
- eksperimentalne in
- matematične metode.

V nadaljevanju tega dela bomo obravnavali matematično metodo in računalniški program s katerim smo izračunali temperaturne porazdelitve na različnih vezjih in jih primerjali z eksperimentalnimi rezultati. Z matematično analizo smo želeli dobiti poleg temperaturnih porazdelitev še vplive posameznih materialnih konstant na termično obnašanje vezja. Izračunane temperaturne točke smo primerjali z eksperimentalnimi rezultati, ki smo jih dobili z uporabo infrardečega mikroskopa [4,5].

## MATEMATIČNI PRISTOP IN PROGRAM

Ker nas zanima le stacionaren primer prevajanja toplote po substratu vezja (temperatura in funkcija časa) lahko enačbo za prevajanje toplote, ki velja za naš primer napišemo v obliki

$$\nabla^2 T + P - Q_1 - Q_2 = 0 \qquad (1)$$

kjer je $\nabla^2$ Laplaceov operator, $T$ temperatura, $P$ člen, ki vsebuje izvore toplote, $Q_1$ in $Q_2$ pa člena, ki prispevata k ohlajanju: $Q_1$ s konvekcijo in $Q_2$ s sevanjem.

Posamezni členi enačbe (1) so izraženi takole [6]:

$$P = \frac{P_o}{4Kdl^2}$$

$$Q_1 = \frac{h}{2Kd} \Delta T$$

$$Q_2 = \frac{\sigma \varepsilon}{2Kd} (T^4 - T_a^{\,4})$$

kjer pomenijo:

$P_o$ ..... posamezen toplotni izvor $[W]$

$K$ ..... toplotna prevodnost substrata $[W/cm^2\ {}^oK]$, ki je funkcija temperature v obliki:

$K = \alpha - \beta T$

$d$ ..... debelina substrata $[cm]$

$l$ ..... dolžina elementa površine za katerega je enačba napisana $[cm]$

$h$ ..... koeficient konvekcije $[W/cm^2\ {}^oC]$, ki je funkcija temperature v obliki:

$h = \gamma T^{1/4}$

$\varepsilon$ ..... emisijski koeficient (v našem primeru 0.88)
$\sigma$ ..... Stefan-Baltzmanova konstanta $[W/cm^2\ {}^oK^4]$
$T_a$ ..... temperatura okolice $[{}^oK]$

Za numerično reševanje enačbe (1) smo keramičen substrat z natisnjenim vezjem razdelili na n x m manjših kvadratkov, kot je to prikazano na sliki 1, ter za vsak kvadratek napišemo enačbo (1), ki se sedaj glasi:

$$T_{ij} = \frac{T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1}}{4} - \frac{l^2 h}{2Kd}(T_{ij} - T_a) - \frac{\sigma \varepsilon l^2}{2Kd}(T_{ij}{}^4 - T_a{}^4) + \frac{P_{ij}}{4Kd} \tag{2}$$

Faktor $l^2$ je v vseh členih zaradi dimenzije Laplaceovega operatorja $\nabla^2 [cm^2]$. Člen, ki vsebuje $P_{ij}$ je različen od nič samo za tiste kvadratke na substratu, na katerem je natisnjena elektronska komponenta, ki oddaja neko moč.

S tem smo dobili sistem m x n enačb za m x n temperatur $T_{ij}$. Pripomniti je treba, da se v skladu z geometrijo substrata posamezni členi enačbe (2) na določenih mestih napišejo nekoliko drugače.

Za rob substrata dobimo izraz:

$$T_{ij} = \frac{T_{\leftarrow} + T_{\downarrow} + T_{\rightarrow}}{3} - \frac{l^2 h}{2Kd}\left(1 + \frac{d}{2\ell}\right)(T_{ij} - T_a) - \frac{\sigma \varepsilon l^2}{2Kd}\left(1 + \frac{d}{2\ell}\right) \cdot (T_{ij}{}^4 - T_a{}^4) + \frac{P_{ij}}{3Kd} \tag{3}$$

Za vogal substrata pa:

$$T_{ij} = \frac{T_{\downarrow} + T_{\rightarrow}}{2} - \frac{\ell^2 h}{2Kd}\left(1 + \frac{d}{\ell}\right)(T_{ij} - T_a) - \frac{\sigma \varepsilon \ell^2}{2Kd}\left(1 + \frac{d}{\ell}\right)(T_{ij}{}^4 - T_a{}^4) + \frac{P_{ij}}{2Kd}, \tag{4}$$

kjer pomenijo puščice kot indeksi pri temperaturi sosednje kvadratke, ki jih je treba zamenjati in se pri drugačnem položaju kvadratka (drug rob ali vogal) ciklično zamenjajo

$$(\leftarrow_{\downarrow}\rightarrow\ ,\ {}_{\downarrow}{}^{\uparrow}\rightarrow\ ,\ \leftarrow^{\uparrow}\rightarrow\ ,\ \ldots)$$

Za faktor $\gamma$ , ki nastopa v konvekciji smo pri numeričnem delu uporabljali izraz:

$$= 0.877.10^{-4} \left(\frac{m \times n}{m + n} \ell\right)^{0,25} . \ T^{0,25}$$

Diagram poteka računalniškega programa za reševanje našega problema je prikazan na sliki 2. S(I,J) in T(I,J) sta temperaturni polji, ki predstavljata substrat in ju izmenično izračunavamo. Specifične in splošne vrednosti A in B so izrazi, ki se v enačbah (2), (3) in (4) razlikujejo. A je enak 4,3 ali 2; B pa 1, $(1+ \frac{d}{2\ell})$ ali $(1+ \frac{d}{\ell})$. Pripomniti je treba, da je konvergenca za to metodo sorazmeroma počasna in je tako za drobnejšo razdelitev substrata na manjše kvadratke precej zamudna celo na velikih računalnikih.

## REZULTATI IN DISKUSIJA

Na sliki 3 je prikazana primerjava med eksperimentalnimi in teoretičnimi maksimalnimi temperaturami na substratu v odvisnosti od moči upora. Posamezne premice predstavljajo račune z različnimi koeficienti $\alpha$ in $\beta$ pri toplotni prevodnosti K. Vidimo, da s skrbno izbiro teh dveh koeficientov lahko zelo dobro ujamemo eksperimentalne podatke. Eksperimenti in računi so bili narejeni za substrat z velikostjo 50 x 50 x 0,75 $mm^3$, s tem da je izvor moči, v velikosti 5 x 5 $mm^2$, natanko na sredini substrata.

Slika 4 kaže izračunani temperaturni profil tega substrata pri obremenitvi 1,5 W. Eksperimentalna vrednost maksimalne temperature je samo 4°C ali 7 % višja od vrednosti določene z računom.

Pri matematičnem modelu so bile narejene nekatere poenostavitve ([7]):

- za celotno površino substrata smo vzeli isto vrednost koeficienta emisije $\varepsilon$ ,
- predpostavili smo, da je temperaturni profil na obeh straneh substrata isti in
- da se nič toplote ne izgubi preko električnih kontaktov.

Kljub poenostavitvam smo dobili dokaj zadovoljivo ujemanje, ki v prvi vrsti zagotavlja dobre relativne vrednosti temperaturnih profilov, pri skrbnejši analizi posameznih materialnih konstant (kot n.pr. toplotne prevodnosti) pa tudi absolutno ujemanje.

Delo je bilo opravljeno s finančno pomočjo Sklada Borisa Kidriča.

LITERATURA:


1 J.T. Hughes, Thermal Considerations in Hybrid Forms of Construction, Proceedings, International Conference on Hybrid Microelectronics, Kent 1973.

2 D.J. Dean
Graphical and other Methods of Microcircuit Thermal Analysis at the desk. Proceedings, Internepcon UK 1972.

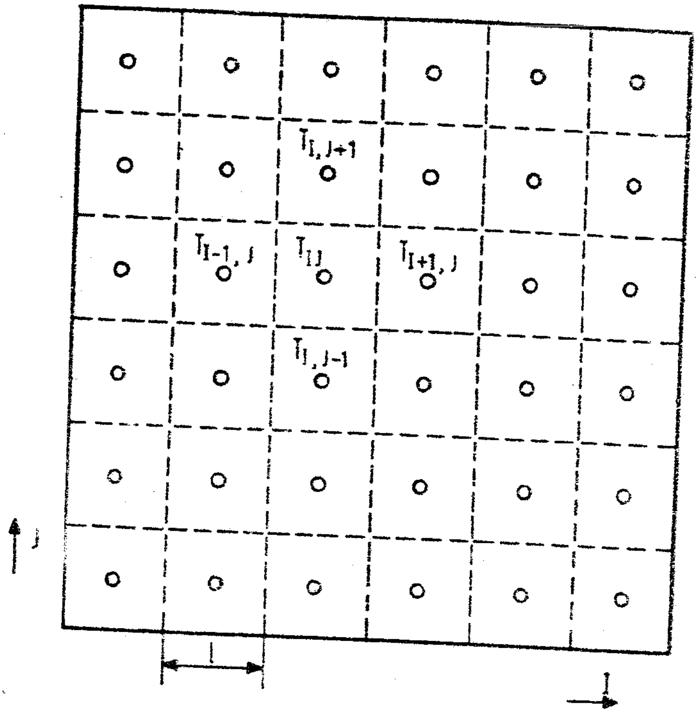
3 D.J. Dean
The Estimation of Temperature Distributions in Microelectronics Assemblies, AWRE Report No O24/70

4 F. Jan, Thermal Analysis of Hybrid Thick film Microcircuits, Report Edinburgh University, School of Engineering Science, July 1971

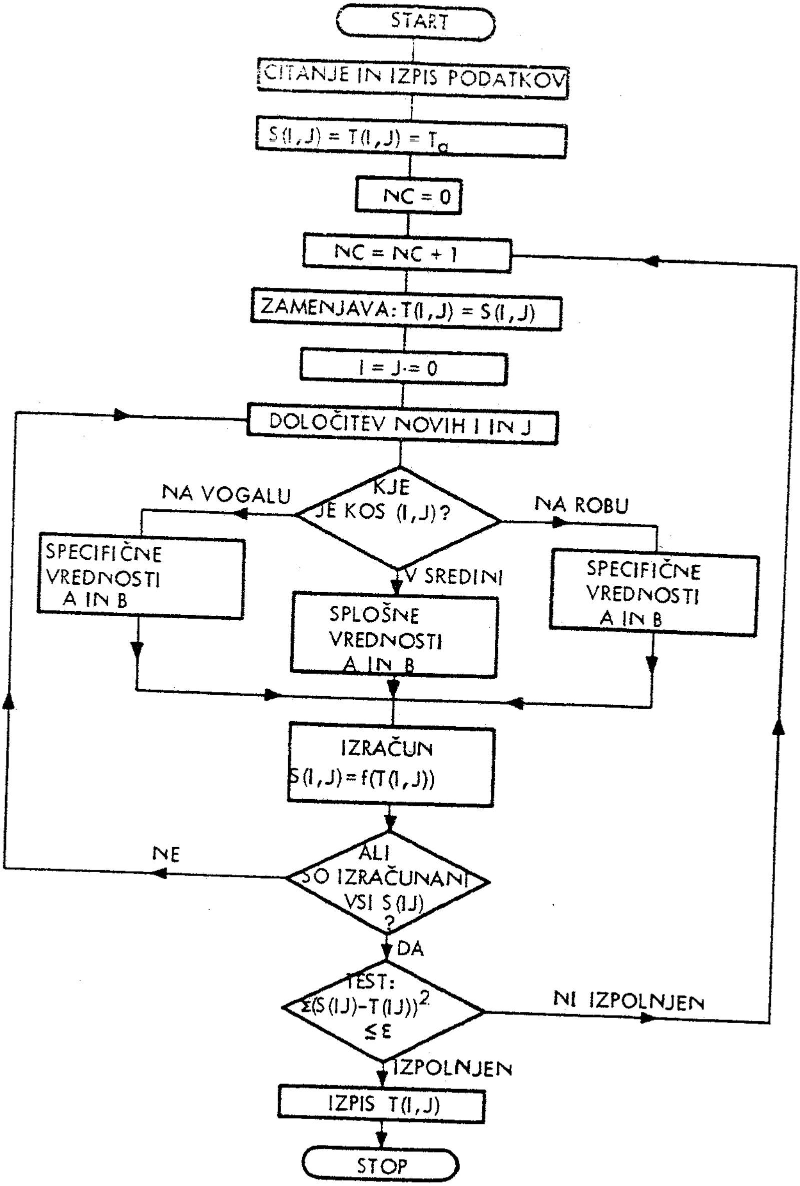
5 F. Jan, Termična analiza hibridnih debeloplastnih vezij. Zbornik referatov - SD 71, (Ljubljana), str. 41-63

6 H.W. Emmons, The Numerical Solution of Heat - Conduction Problems. Trans. Am. Soc. Mech. Eng. 65 (1943) 607

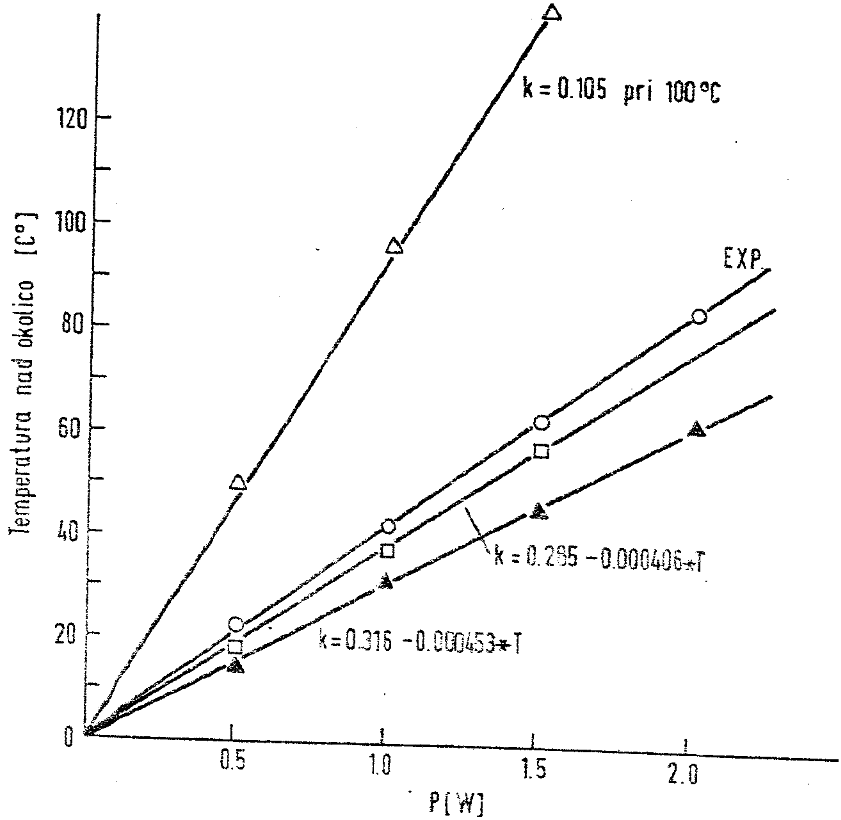
7 J.E. Martin, V.T. Guntlow and D.P. Burke, Thermal Analysis of Ceramic - based Microcircuits, Electronic Components, June 1970.



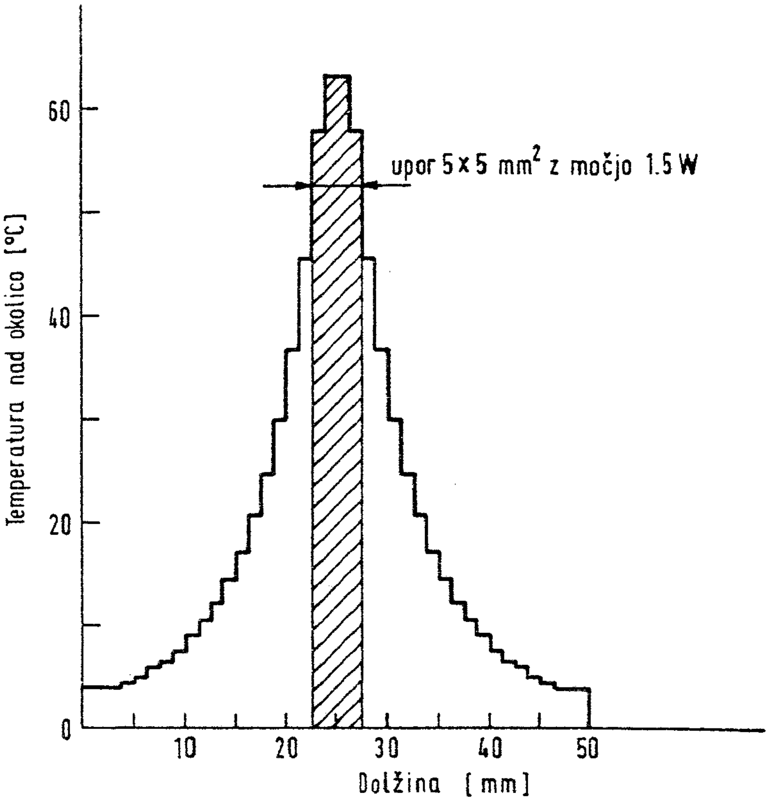

Slika 1 : Substrat razdeljen v kvadratno mrežo


START
CITANJE IN IZPIS PODATKOV
S(I,J) = T(I,J) = Ta
NC = 0
NC = NC + 1
ZAMENJAVA: T(I,J) = S(I,J)
I = J = 0
DOLOČITEV NOVIH I IN J
KJE JE KOS (I,J)?
NA VOGALU
NA ROBU
V SREDINI
SPECIFIČNE VREDNOSTI A IN B
SPLOŠNE VREDNOSTI A IN B
SPECIFIČNE VREDNOSTI A IN B
IZRAČUN S(I,J)=f(T(I,J))
ALI SO IZRAČUNANI VSI S(IJ) ?
NE
DA
TEST: Σ(S(IJ)-T(IJ))2 ≤ ε
NI IZPOLNJEN
IZPOLNJEN
IZPIS T(I,J)
STOP

Slika 2




Slika 3 : Maksimalna temperatura na substratu v odvisnosti od moči upora.




Slika 4 : Temperaturni profil na substratu $50 \times 50 \times 0.75$ mm$^3$