

# Többrétegűen fémezett mikroszalagtápvonalak vesztesége

VÉRTESEY MIKLÓS  
 REMIX Rádiótechnikai Vállalat  
 ACZÉL JUDIT  
 Távközlési Kutató Intézet

## ÖSSZEFOGLALÁS

Többrétegűen fémezett mikroszalagtápvonalak veszteségnövekedését vizsgáltuk az alsó (tapadó) fémréteg tulajdonságainak függvényében. A veszteségnövekedésnek a tapadó réteg fajlagos ellenállásának a függvényében maximuma van (melynek értéke 5-15 l X cm között van). Ennek megfelelően a kis veszteség elérése érdekében a tapadó réteg fajlagos ellenállását 50 l X cm-nél nagyobbakra kell megválasztani a technológiailag jól megvalósítható legkisebb rétegvastagság mellett.

Mikrohullámú integrált áramkörök mikroszalagtápvonalainak vesztesége a hordozó dielektromos -, a vezető fém ohmos-, valamint a sugárzási veszteségekből tevődik össze [1-3]. A gyakorlati esetekben használt nagy permittivitású hordozóknál 20 GHz frekvencia alatt a sugárzási veszteség elhanyagolható [3]. Vékonyréteg áramköröknél nagytisztaságú Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hordozó esetén minimális (néhány százalék) a dielektromos veszteség is, így a veszteség döntő forrása az ohmos veszteség, mely a mikroszalagvezető és az alaplemez felületi ellenállásával (R<sub>s</sub>) valamint a felületi áramsűrűségekkel fejezhető ki [3]

$$\alpha_c = \frac{R_{s1}}{2Z} \int_{-w/2}^{w/2} \frac{|J_1|^2}{|I|^2} dx + \frac{R_{s2}}{2Z} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|J_2|^2}{|I|^2} dx, \quad (1)$$

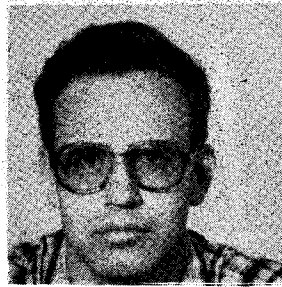
ahol az "1" index a szalagvezetőre, "2" az alaplemezre utal, I a teljes áramot jelöli, w a szalagvezető szélessége (x irányban). A mikrohullámú felületi ellenállást - homogén fémezés esetén - az

$$R_s = \frac{\zeta}{\delta_s} \quad (2)$$

kifejezés írja le, ahol  $\zeta$  a fémréteg fajlagos ellenállása,  $\delta_s$  pedig a skin mélység, mely a frekvencia reciprokéinak a négyzetgyökével arányos

$$\delta_s = \sqrt{\frac{\zeta}{\pi \cdot f \cdot \mu}},$$

ahol f a frekvencia,  $\mu$  a mágneses permeabilitás.



VÉRTESY MIKLÓS

1965-ben végzett az ELTE fizikus szakán, 1970-ben a BME-n félvezető eszközgyártási szakmérnöki oklevelet szerzett.

1965-86 között a Távközlési Kutató Intézet dolgozója volt. 1977-ben "Anomális bórdiffúzió vizsgálata Si egykristályokban" témakörben egyetemi doktori fokozatot kapott.

1987-től a REMIX-ben dolgozik, hibrid áramköri technológiával foglalkozik.

1987-ben a műszaki tudomány kandidátusa fokozatot ért el.

Fő munkaterülete a mikrohullámú hibrid integrált áramkörökkel kapcsolatos kutatásfejlesztési tevékenység.



ACZÉL JUDIT

A Budapesti Műszaki Egyetem Villamosmérnöki Karán műszer és finommechanikai szakon szerzett oklevelet 1966-ban.

A Távközlési Kutató Intézetben dolgozik 1966-óta, mint tudományos munkatárs. 1973-ban villamosmérnök-matematikai szakmérnöki képesítést szerzett.

Tématerülete a mikrohullámú integrált áramkörök technológiája, ezen belül elsősorban a fotoreziszttechnika és topológiai tervezés, valamint a maszk előállítás.

Az ohmos veszteség egyszerűsítő feltevések esetén (a mikroszalagvezető és alaplemez fémezését egyformának feltételezve, valamint a terjedés irányába folyó áramokat elhanyagolva) a következő alakban írható fel:

$$\alpha_c = 8,686 \frac{R_s}{Z \cdot w} K \quad (3)$$

(R<sub>s</sub> és Z ohm, w pedig cm egységben van megadva). A K korrekciós faktor a mikroszalagvezető árameloszlását írja le, melyre különböző modellek ismeretesek [3-6]. A K értéke általában 0,5-0,8 között változik.

A mikrohullámú vékonyréteg áramköröknél a fémezéssel szemben támasztott követelmények (a jó vezetőképeség, a jó tapadás, a jó hővezetőképeség, a stabilitás, stb.) egyetlen fémréteggel nem elégíthetők ki, több fémrétegre, szendvics szerkezetre van szükség. A jól vezető fémek (réz, arany) rosszul tapadnak a hor-

dozókra, így közülük egy, a hordozóhoz jól tapadó fémréteg (mely általában nagy fajlagos ellenállású) felvitele szükséges. A tapadó és a vezető réteg közé sokszor még 1-2 köztes (pl. diffúziót gátló) réteget is felvisznek. Ilyen esetben a szendvics szerkezet miatt a veszteség meghatározására a homogén fémezés kifejezései nem alkalmazhatók, a veszteség többé-kevésbé megnő. A különböző réteg kombinációk közül a NiCr-Au, a Cr-Cu-Au és a Ta<sub>2</sub>N-Ti-Pd-Au összetételűek a legelterjedtebbek.

Ha a fémezés két vagy három rétegből tevődik össze, az egy rétegű fémezéshez képesti veszteség növekedés viszonylag egyszerűen számolható.

Két réteg esetén (jelölések a 1. ábrán) a mikrohullámú felületi ellenállás a következő alakban fejezhető ki [2, 7-8]:

$$R_s = R_{s1} \frac{(a+1)^2 e^{4u} + 2(a^2+1)e^{2u} \sin 2u - (a-1)^2}{(a+1)^2 e^{4u} - 2(a^2-1)e^{2u} \cos 2u + (a-1)^2} = R_{s1} \cdot F(a, u) \quad (4)$$

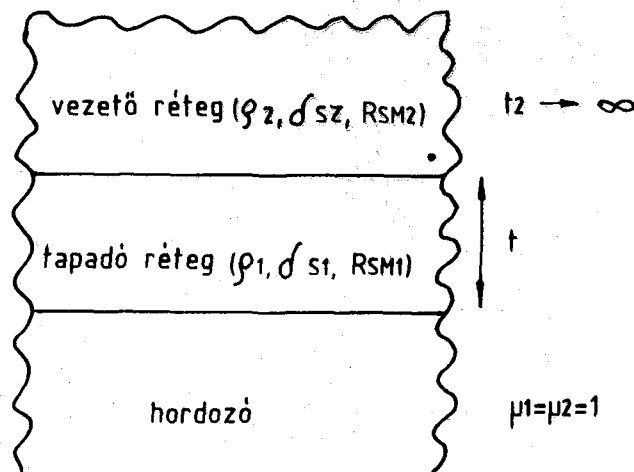
ahol

$$a = \frac{R_{s2}}{R_{s1}} = \sqrt{\frac{\zeta_2}{\zeta_1}} = \frac{\delta_{s2}}{\delta_{s1}} \quad \text{ha } \mu_1 = \mu_2 = 1 \quad (5)$$

$$u = \frac{t}{\delta_{s1}} \quad (6)$$

Az 1 index az alsó tapadó, a 2-es pedig a tényleges vezető fémréteget jelenti, t a tapadó réteg vastagsága. A számítás során a vezető réteg vastagságát végtelennek tételeztük fel. A továbbiakban a hibrid gyakorlatnak megfelelően csak olyan eseteket vizsgálunk, ahol a < 1, vagyis a tapadó réteg fajlagos ellenállása nagyobb a felső, vezető rétegnél.

A homogén fémezésű (csak vezető réteg) és kétrétegű fémezésű szalagtápvonalak vesztesége kifejezhető a mikrohullámú felületi ellenállások hányadosával [2, 7] azaz



H579-1

1. ábra. Kétrétegű fémezés jelölései

$$\frac{\alpha_c}{\alpha_{c, \text{hom}}} = \frac{R_s}{R_{s2}} = \frac{R_{s1}}{R_{s2}} F(a, u) = \frac{1}{a} F(a, u) \quad (7)$$

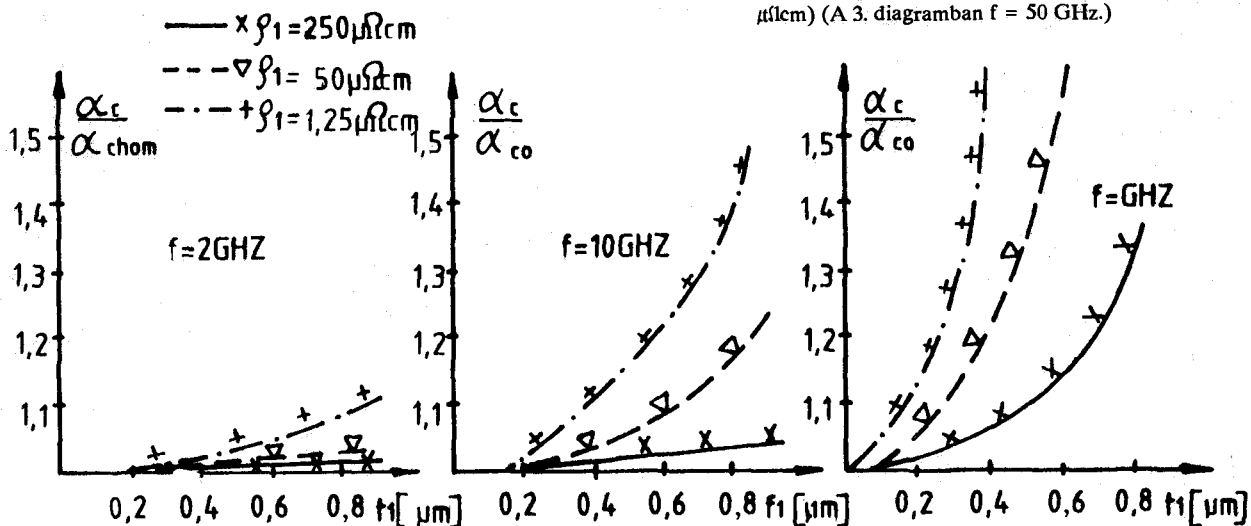
A szalagtápvonal homogén fémezéshez képesti veszteségnövekedése tehát a két réteg fajlagos ellenállásának a hányadosától, valamint a tapadó fémréteg skin mélységhez viszonyított vastagságától függ. (A frekvencia függés a skin mélységen keresztül vehető figyelembe).

A veszteségnövekedést leíró F(a, u) függvénynek szélső értéke (maximuma) van a tapadó réteg vastagságának és fajlagos ellenállásának a függvényében. A rétegvastagság függvényben a görbe első maximuma a

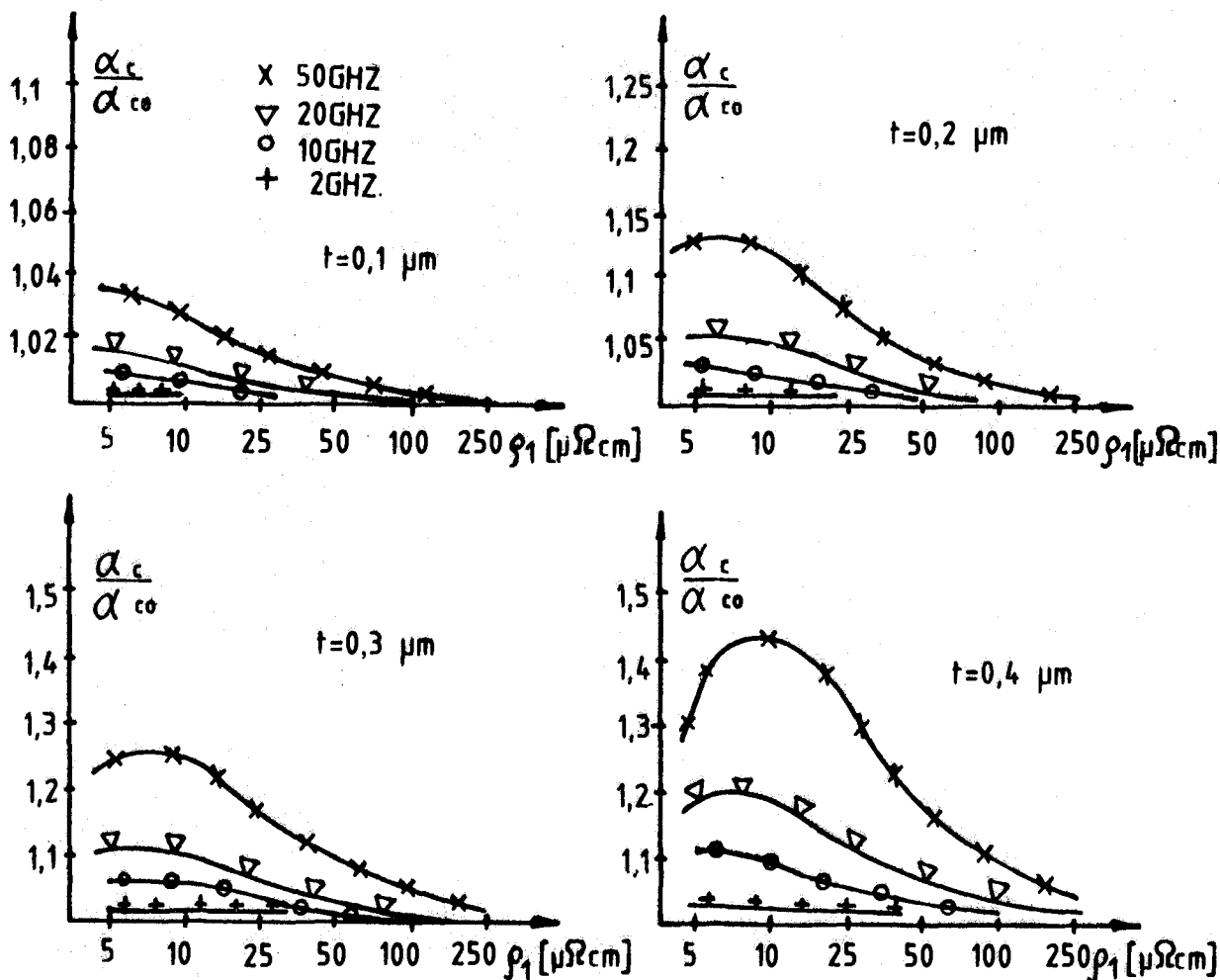
$$t_{\text{max}} = \frac{\pi}{2} \delta_{s1} \quad (8)$$

vastagságnál van [8]. A szélsőértékhez tartozó vastag-

2. ábra. Mikroszalagtápvonalak relatív veszteségnövekedése a tapadó réteg vastagságának a függvényében ( $\delta_2 = 2,5 \mu\text{m}$ ) (A 3. diagramban  $f = 50 \text{ GHz}$ .)



H579-2



3. ábra. Mikroszalagtápvonal relatív veszteségnövekedése a tapadóréteg fajlagos ellenállásának függvényében ( $\delta = 2,5 \mu\text{m}$ )

ságra igen nagy értékek adódnak: 10 GHz-es pl.  $\zeta_1 = 50 \mu\Omega\text{cm}$  esetén  $6 \mu\text{m}$ ,  $250 \mu\text{m}$  esetén pedig  $12,2 \mu\text{m}$ . A kis veszteség elérése érdekében az F függvényt minimalizálni kell, azaz célszerű igen vékony tapadó réteget előállítani. A gyakorlati esetekben a rétegvastagság nem lépi túl az 1-2 tized  $\mu\text{m}$ -t.

Az F veszteségnövekedés függvényt a 2. ábrán mutatjuk be. Az ábrán látható, hogy a veszteségnövekedés 2 GHz frekvencián elhanyagolható, a szokásos rétegvastagság mellett nem éri el az 1 %-t sem. A veszteség növekedés 10 és 50 GHz-en már jelentősebb, de pl. a 10 %-os veszteségnövekedéshez tartozó vastagság értékek (melyek a fajlagos ellenállástól is függenek) így is viszonylag nagyok, meghaladják a 0,4 ill.  $0,2 \mu\text{m}$ -t. 10 GHz frekvencián, ha a rétegvastagság  $0,3 \mu\text{m}$ -nál kisebb és a fajlagos ellenállás  $50 \mu\Omega\text{cm}$ , a veszteségnövekedés 1 % alatt van. Érdeemes megfigyelni, hogy a kisebb fajlagos ellenállású tapadó rétegnél nagyobb a veszteségnövekedés.

A 3. ábrán a tapadó réteg fajlagos ellenállásának a függvényében mutatjuk be a veszteségnövekedést (4 rétegvastagság és 4 frekvencia esetén). A számítások során a vezető réteg fajlagos ellenállását  $2,5 \mu\Omega\text{cm}$ -nek

(arany réteg) vettük. A veszteségnövekedés függvény maximuma - az általunk vizsgált esetekben -  $15 \mu\Omega\text{cm}$  alatt volt. A maximum helyét a frekvencia és a rétegvastagság csak kis mértékben befolyásolja.

A 3. ábrán még jobban látható, hogy a kis veszteség elérése érdekében a tapadó réteg fajlagos ellenállását minél nagyobbra (legalább  $50 \mu\Omega\text{cm}$ -re) kell választani a technológiai okokból szükséges legkisebb rétegvastagság mellett. (A vezető réteg fajlagos ellenállását természetesen minimális értéken kell tartani).

A nagyobb fajlagos ellenállású tapadó rétegnél fel lépő kisebb veszteséget a skin hatással lehet magyarázni. Nagyobb fajlagos ellenálláshoz nagyobb skin mélység tartozik, így azonos rétegvastagság mellett - növelve a fajlagos ellenállást - az elektromos áram egyre kisebb része fog a tapadó rétegben folyni, azaz egyre nagyobb hányad folyik a vezető rétegben. Ez veszteség csökkenést okoz.

Három vagy több réteg esetén a mikroszalagtápvonalak relatív veszteségét leíró kifejezések lényegesen bonyolultabbak [2, 7, 8], a kétrétegű fémezésre vonatkozó általános megállapítások azonban ezekben az esetekben is igazak. Kis veszteség elérése érdekében arra kell törekedni, hogy az ellenállás, tapadó és köz-

H579-3

Többrétegű fémezett mikroszalagpáronalak veszteségértékeinek összehasonlítása

Réteggombináció	Rétegjellemzők			mért veszteség $f = 8\text{GHz}$ [dB/cm]	$\alpha_c/\alpha_{\text{chom}}$
	összetétel	$\zeta$ [ $\mu\Omega\text{cm}$ ]	$t$ [ $\mu\text{m}$ ]		
1.	Ta <sub>2</sub> N	220	0,06	5,2 · 10 <sup>-2</sup>	1,01
	Ti	80	0,1		
	NiCr	150	0,3		
	Au	2,5	10		
2.	Ti	50	0,4	5,3 · 10 <sup>-2</sup>	1,02
	Pd	15	0,16		
	Au	2,5	10		
3.	NiCr	130	0,4	5 · 10 <sup>-2</sup>	1,01
	Au	2,5	10		
4.	Cu (kémiai)	3,1	0,9	7,5 · 10 <sup>-2</sup>	1,7
	Cu (galv)	2	10		

tes rétegek fajlagos ellenállásai minél nagyobbak, vastagságuk viszont minél kisebb legyen.

A fentiek kísérleti alátámasztására két ül. több rétegű fémezéssel különböző fajlagos ellenállású tapadó rétegeket állítottunk elő. Vastagságukat - a gyakorlatban előforduló vastagsághoz képest - viszonylag nagy-nak választottuk, hogy a veszteségnövelő hatás minél nagyobb legyen. A réteggombinációkat és a rétegjellemzőket, a gyűrűs rezonátorral mért veszteségadatok valamint a 7. képletnek megfelelő veszteségnövekedéseket az 1. táblázatban foglaltuk össze.

A táblázatban látható, hogy a nagy fajlagos ellenállású tapadó és köztes rétegek esetén a viszonylag nagy rétegvastagságok (összrétegvastagság) mellett sem növekszik meg a veszteség. A veszteségnövekedés egyedül 4. számú réteggombinációnál jelentős, ahol a tapadó réteg (a bulk rézhez képest) viszonylag nagy fajlagos ellenállású és vastagságú kémiai úton előállított réz volt. Ez a kis fajlagos ellenállás növekedés jelentős veszteségnövekedést okozott.

#### Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton is kifejezik köszönetüket Kusztor László kollégának a gyűrűs rezonátor mérések elvég-

zéséért, valamint dr. Kósza Géza, dr. Nagy István és Thomán Valér kollégáknak a különböző réteggombinációjú fémezések elkészítéséért.

#### IRODALOM

- [1] M.V.Schneider: Microstrip lines microwave integrated circuits. Bell S.T.J. 48. 1421-1444, May-June 1969.
- [2] L.Young, H.Sobol: Advances in microwaves, Vol.8. Academic Press, New York, 1976.
- [3] S.Hagelin, L.-D.Wernlund: Properties of microstrip transmission lines, FOA 3 rapport, C 376g-E2, Juni 1974. Försvarets Forskningsanstalt, Stockholm
- [4] R.A.Pucei, D.J.Masse, C.P.Hartwig: Losses in microstrip, IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. MTT-16, 342-350, 1968.
- [5] M.Coulton, H.Sobol: Microwave integrated - circuit technology - A survey. IEEE Journal of Solid-State Circuits. SC-5, 292-303, Dec. 1970.
- [6] M.Coulton, J.J.Hughes, H.Sobol: Measurements on the properties of microstrip transmission lines for microwave integrated circuits, RCA Review, 377-351, 1966.
- [7] H.Sobol: Applications of integrated circuit technology to microwave frequencies, Proc. IEEE, 59, 1200-1211, Aug. 1971.
- [8] Gy.Fodor: A.C. impedance of laminated conductors, Acta Technica, XXXI./1-2, 33-68, 1968.