

Circuite și Dispozitive pentru Microunde

Linii microstrip

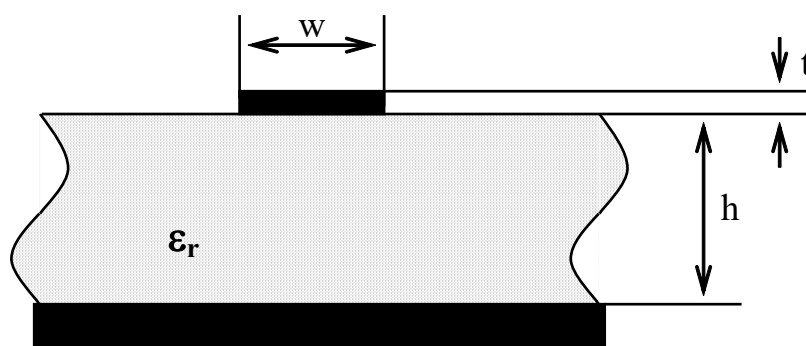
Notă: Chiar dacă o imagine conține mai multă informație decât textul din 1000 de cuvinte, trebuie citit și textul.

Supliment teoretic

Linii planare

1. Linia microstrip

Varianta cea mai importantă și cea mai utilizată dintre liniile de transmisie este linia microstrip.



Linia microstrip

Linia este realizată dintr-un conductor panglică îngust cu lățimea w și grosimea t (standardizată) plasat pe partea frontală a stratului dielectric și un al doilea conductor acoperind întreaga suprafață a substratului, de grosime variabilă în funcție de necesitate și conectat la masă.

Spre deosebire de configurația strip-line unde conductorul se găsește între două plane de masă (figura 1.a), în liniile de transmisie microstrip nu se propagă numai modul TEM, acestea tinzând să fie dispersive, în sensul că linia are constantă de dispersie și impedanță caracteristică variabilă cu frecvența. Ca urmare undele care se transmit pe linie vor fi moduri quasi-TEM. Efectul este mai pronunțat când frecvența este în apropierea frecvenței de tăiere a modului TEM.

Vom determina în continuare expresia impedanței caracteristice a liniei microstrip, în conformitate cu relațiile descoperite de Kirschning și Jansen (Electronics Letters, 18 martie 1982, vol. 18, No. 6, pp 272-273), validate experimental de Deybele și Bayer (IEEE Trans MTT, vol. MTT-35, No. 5, mai 1987, pp 535-538).

Relațiile sunt rezultate în urma simulărilor pe calculator și ca urmare au un puternic caracter empiric. Cu notațiile:

$$U = \frac{w}{h} ; B = \frac{t}{h} \quad (1)$$

vom obține lățimea corectată pentru mediu omogen:

$$U_1 = U + \frac{B \ln \left\{ 1 + \frac{4e}{B} \tanh^2 \left[(6.517U)^{0.5} \right] \right\}}{\pi} \quad (2)$$

Efectuăm corecția pentru mediu neomogen:

$$U_r = U + \frac{(U_1 - U) \left\{ 1 + \frac{1}{\cosh \left[(\epsilon_r - 1)^{0.5} \right]} \right\}}{2} \quad (3)$$

Se utilizează U_r și ϵ_r pentru determinarea unei valori Y intermediare:

$$A_u = 1 + \frac{\ln \left(\frac{U_r^4 + \frac{U_r^2}{2704}}{U_r^4 + 0.432} \right)}{49} + \frac{\ln \left[\left(\frac{U_r}{18.1} \right)^3 + 1 \right]}{18.7} \quad (4)$$

$$h_{er} = 0.564 \left(\frac{\epsilon_r - 0.9}{\epsilon_r + 3} \right)^{0.053} \quad (5)$$

$$Y = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{U_r} \right)^{-(A_u \cdot w_{er})} \quad (6)$$

Se găsește impedanța caracteristică fără efectul frecvenței (la frecvențe joase):

$$Z_0 = \frac{Z_{01}(U_r)}{Y^{0.5}} \quad (7)$$

funcția $Z_{01}(x)$ fiind dată de:

$$Z_{01}(x) = \frac{\eta_0 \ln \left\{ \frac{\left[6 + (2\pi - 6) e^{-\left(\frac{30.666}{x} \right)^{0.7528}} \right]}{x} + \left(\frac{4}{x^2} + 1 \right)^{0.5} \right\}}{2\pi} \quad (8)$$

Determinăm constanta dielectrică efectivă la joasă frecvență:

$$\epsilon_{ef0} = Y \left(\frac{Z_{01}(U_1)}{Z_{01}(U_r)} \right)^2 \quad (9)$$

Aceste relații se datorează în principal lui Hammerstad și Jensen (“Accurate models for microstrip computer-aided design”, 1980 IEEE MTT-S International Symposium Digest, May 1980, IEEE Catalog #80CH1545-3MTT, pp. 407-409). În continuare se prezintă factorul de umplere P introdus de Kirschning și Jansen, care oferă precizie mai bună în ceea ce privește dispersia în frecvență.

$$P_1 = 0.27488 + U \left[0.6315 + 0.525(0.0157f \cdot h)^{-20} \right] - 0.065683e^{-8.7513 \cdot U}$$

$$P_2 = 0.33622 \left(1 - e^{-0.03442 \cdot \epsilon_r} \right)$$

$$P_3 = 0.0363e^{-4.6 \cdot U} \left[1 - e^{-\left(\frac{f \cdot h}{38.7} \right)^{4.97}} \right]$$

$$P_4 = 2.751 \left[1 - e^{-\left(\frac{\epsilon_r}{15.916} \right)^8} \right] + 1$$

$$P = P_1 P_2 [f \cdot h \cdot (0.1844 + P_3 P_4)]^{1.5763} \quad (10)$$

Aplicând această relație vom găsi permitivitatea efectivă și impedanța caracteristică la o anumită frecvență f .

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_{\text{ef0}}}{1 + P} \quad (11)$$

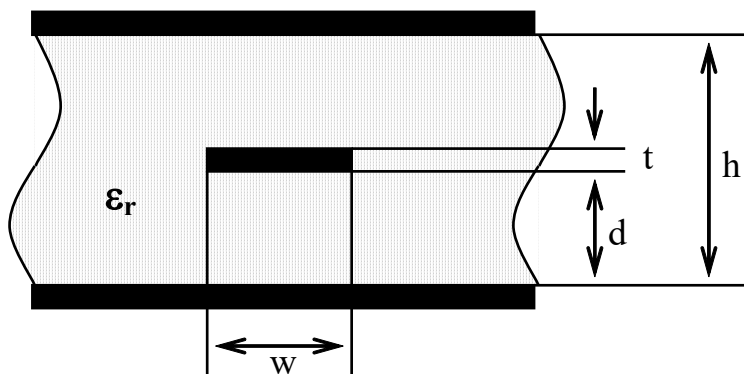
$$Z_{0f} = Z_0 \left(\frac{\epsilon_{\text{ef0}}}{\epsilon_{\text{eff}}} \right)^{0.5} \frac{\epsilon_{\text{eff}} - 1}{\epsilon_{\text{ef0}} - 1} \quad (12)$$

În aceste relații avem următoarele exprimări numerice:

$$h[\text{mm}], f[\text{GHz}], \eta_0 = 376.73, c = 299.792[\text{mm/ns}] \quad (13)$$

2. Linia strip

Vom calcula impedanța caracteristică a unui linii strip.



Linia strip-line

Relații unitare și precise de calcul pentru calcularea impedanței caracteristice a liniei de transmisie strip dacă sunt îndeplinite următoarele condiții:

- Conductorul interior este centrat între cele două plane de masă.
- mediul dielectric este omogen și izotrop în ceea ce privește constanta dielectrică.

Liniile strip lipite cu adezivi pentru îndepărtarea aerului de la marginile conductorului central pot fi proiectate cu precizie cu aceste relații. În cazul liniilor realizate prin presare impedanța și constanta dielectrică vor fi puțin mai mici decât cele calculate datorită spațiilor existente la interfața dintre cele două plăci.

Analiza liniei strip a fost făcută de S.B. Cohn (“Characteristic Impedance of the Shielded-Strip Transmission Line”, IRE Trans MTT, iulie 1954, pp 52-57 și “Problems in Strip Transmission Lines”, IRE Trans MTT, martie 1955). Astfel pentru cazul liniilor înguste:

$$\frac{w}{h-t} < 0.35 \quad (14)$$

se poate realiza calculul bazându-ne pe conductorul circular echivalent.

$$X = \frac{t}{w} \quad (15)$$

$$Y = \frac{1 + t \frac{1 + \ln \frac{4\pi}{X} + 0.51X^2}{X}}{\frac{\pi w}{2}} \quad (16)$$

$$Z_0 = 60 \frac{\ln \frac{4h}{\pi w Y}}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (17)$$

Acuratețea acestor relații lasă de dorit când $X > 0.11$, caz ce trebuie evitat în practică.

Cazul liniilor late:

$$\frac{w}{h-t} \geq 0.35 \quad (18)$$

se bazează pe capacitatea de dispersie:

$$X = \frac{h}{h-t} \quad (19)$$

$$CD = \frac{2X \ln(X+1) - (X-1) \ln(X^2-1)}{\pi} \quad (20)$$

$$Z_0 = \frac{94.15}{\left(CD + \frac{w}{h-t} \right) \sqrt{\epsilon_r}} \quad (21)$$

Relațiile (17),(21) determină un punct de discontinuitate în jurul punctului caracterizat de egalitate în (14),(18). Se poate realiza o medie aritmetică a rezultatelor obținute cu cele două relații pentru variația raportului (14),(18) între 0.3 și 0.4 (de exemplu).

3. Materiale uzuale utilizate în realizarea substraturilor

Materialul dielectric este placat pe ambele fețe cu cupru, prin metoda electrodepunerii sau prin presare mecanică. Grosimile stratului de cupru sunt standardizate și sunt indicate prin raportul greutate / suprafață în uncii / picioare pătrate (oz/ft²) cu 1oz=28.35g și 1ft=30.48cm. Grosimile standard și exprimarea în oz/ft² sunt indicate în tabelul 1.

Greutatea cuprului depus		Grosimea stratului	
oz/ft ²	g/m ²	inch	mm
0.5	152.58	0.0007	0.0178
1.0	305.16	0.0014	0.0356
2.0	610.31	0.0028	0.0712

Tabelul 1. Grosimi standard ale stratului de cupru

În sistemul internațional grosimea stratului de cupru se exprimă prin mărimile standard de 17μm, 35μm și 70μm. De obicei grosimea stratului de cupru utilizată va varia crescător cu creșterea puterii controlate de circuit și descrescător cu creșterea performanțelor circuitului (factor de calitate).

Și grosimile stratului de dielectric sunt fixate, fără a fi însă standardizate. Totuși un standard neoficial lucrează în unitatea de măsură pentru distanță **mil** (1 mil = 10⁻³ inch = 25.4 μm). Fiecare firmă producătoare oferă anumite valori ale grosimii dielectricului cum ar fi: 0.203mm, 0.305mm, 0.406mm, 0.508mm, 0.813mm, 1.524mm (de fapt 8mil, 12mil, 16mil, 20mil, 32mil, 60mil) în cazul firmei Rogers Corporation.

Materialele pentru substraturile dielectrice ale circuitelor integrate pentru microunde se împart în două mari categorii:

- Materiale plastice (organice)
- Materiale anorganice

Dintre materialele plastice putem aminti politetrafluoretilen-ul (PTFE sau TEFLON). Acest material a fost mult timp unul dintre cele mai utilizate materiale deoarece, întărit cu fibră de sticlă, materiale ceramice sau chiar cristale mici de sticlă orientate aleator oferă caracteristici foarte bune de stabilitate electrică, termică și mecanică. Dezavantajul major al utilizării acestui substrat o reprezintă costul crescut de prelucrare, datorită necesității corodării cu sodiu sau plasmă și a lipirii cu adezivi activi la temperatură ridicată.

O alternativă ieftină, dezvoltată la apariția bunurilor de larg consum ce funcționează în gama microundelor, este materialul denumit FR4, realizat dintr-o combinație de rășină epoxidică și sticlă. Performanțele mecanice ale acestui material sunt foarte bune, de asemenea tehnologia de prelucrare este simplă, însă proprietățile electrice sunt mai puțin bune ceea ce a dus la utilizarea acestui substrat mai ales în aparatura de preț redus, fără calități deosebite.

Materialele anorganice care sunt utilizate ca substraturi sunt materialele ceramice (de obicei alumina Al₂O₃), materialele monocristaline (safir, cuarț), semiconductori, substraturi feromagnetice. Acestea din urmă

sunt utilizate în general pentru realizarea dispozitivelor nereziproce: circulatori, izolatori și schimbători de fază (ferite).

Materialele semiconductoare au de obicei pierderi prin conducție destul de mari din această cauză se preferă utilizarea lor numai la realizarea circuitelor integrate monolitice pentru microunde, care se bucură de avantajul realizării pe același substrat și a componentelor active și a celor pasive.

Materialele anorganice cristaline au dezavantajul prețului crescut al materialului intrinsec (safir) sau al unor pierderi dielectrice mari (sticlă). În plus, materialele cristaline sunt predispuse la prezența anizotropiei dielectrice, ceea ce ridică dificultăți suplimentare în exploatare în sensul identificării axelor optice principale a cristalelor.

Alumina este un material ceramic care are proprietăți excelente din toate punctele de vedere. Ea se poate produce în două variante, cu puritate de 99.5% și puritate 96%. Desigur că materialul cu puritatea mai mare este mai performant însă este și mai greu de obținut. Tangenta unghiului de pierderi pentru alumina are o valoare foarte mică, de asemenea coeficientii termici de expansiune liniară, iar conductivitatea termică este foarte mare. Dezavantajul major al acestui material este însă costul de utilizare foarte mare (de aproximativ 10 ori mai mare decât pentru PTFE: 35\$/in² față de 2.8\$/in²). Acest lucru impune utilizarea aluminei mai ales în aplicațiile de performanță foarte ridicată, cum ar fi tehnologia spațială.

Se prezintă în tabelul 2 caracteristicile principalelor materiale utilizate:

	Constanta dielectrică relativă	Factorul de pierderi dielectrice	Conductivitate termică	Coeficient liniar de expansiune	Coeficient de temperatură al lui ϵ_r
Material	-	-	W/cm/K	ppm/K	ppm/K
Al ₂ O ₃ (99.5%)	9.8	0.0001	0.37	6.3	+136
Al ₂ O ₃ (96%)	9.4	0.001	0.35	6.4	-
Safir	9.4;11.6	0.0001	0.42	6.0	+110 ÷ +140
Sticlă cuarț	3.78	0.0001	0.017	0.55	+13
Sticlă Corning 7059	5.75	0.0036	0.012	4.6	-
BeO Ceramic (98%)	6.3	0.006	2.1	6.1	+107
TiO ₂	85	0.004	0.05	7.5	-575
Tetratitanat de Ba (BaTi ₄ O ₉)	37	0.0005	0.02	9.4	-26
Zirconat	20-40	0.002	-	5.0	-130 ÷ +100
GaAs	12.9	0.002	0.46	5.7	-
Si	11.9	0.015	1.45	4.2	-
Ferită	9-16	0.001	-	-	-

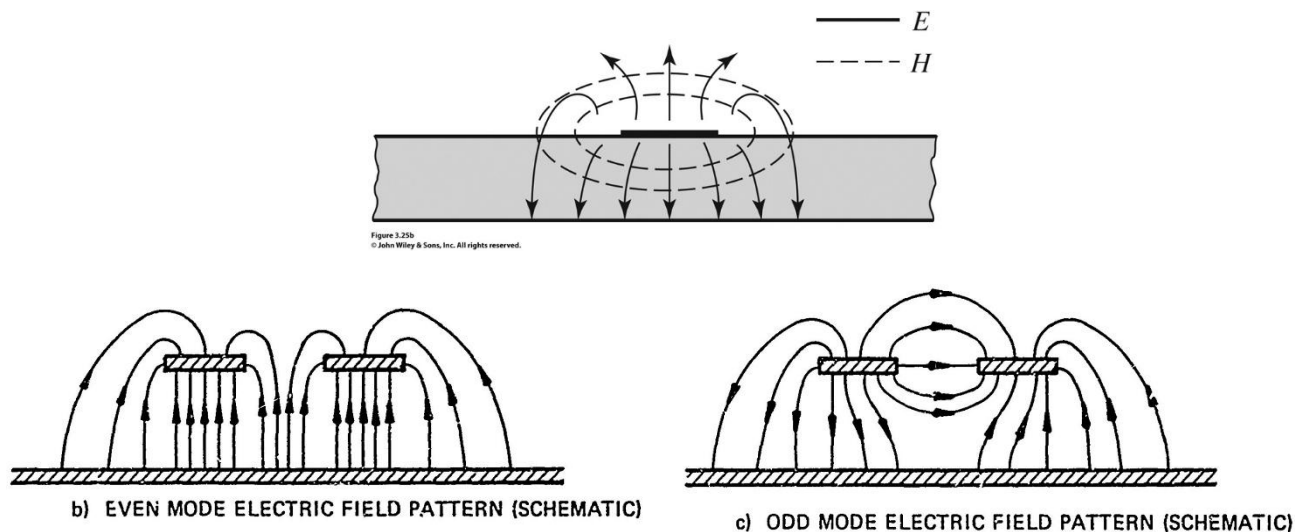
Tabelul 2. Proprietățile principalelor materiale utilizate ca substraturi

În ultimul timp se remarcă apariția unor materiale noi obținute prin combinațiile materialelor prezentate anterior care să îndeplinească simultan două condiții: proprietăți la fel de bune ca ale PTFE, alumina, la un preț de cost (material și tehnologie de prelucrare) asemănător materialelor ieftine: FR4.

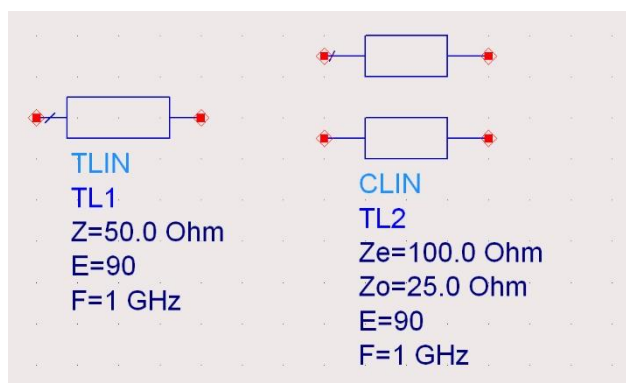
De exemplu firma Rogers Corporation oferă materialele din seriile RO3000 (combinație PTFE și material ceramic) și RO4000 (combinație hidrocarbon-ceramică întărită cu sticlă) care oferă la prețuri mici calități deosebite electrice, termice și mecanice, împreună cu avantajul unei tehnologii asemănătoare cu a rășinii epoxidice (FR4).

4. Linii cuplate

În cazul în care două linii sunt apropiate apare cuplaj între câmpurile celor două linii. Sistemul poate fi caracterizat prin suprapunerea efectelor între o excitație de mod comun și o excitație de mod diferențial (analiză par/impar).

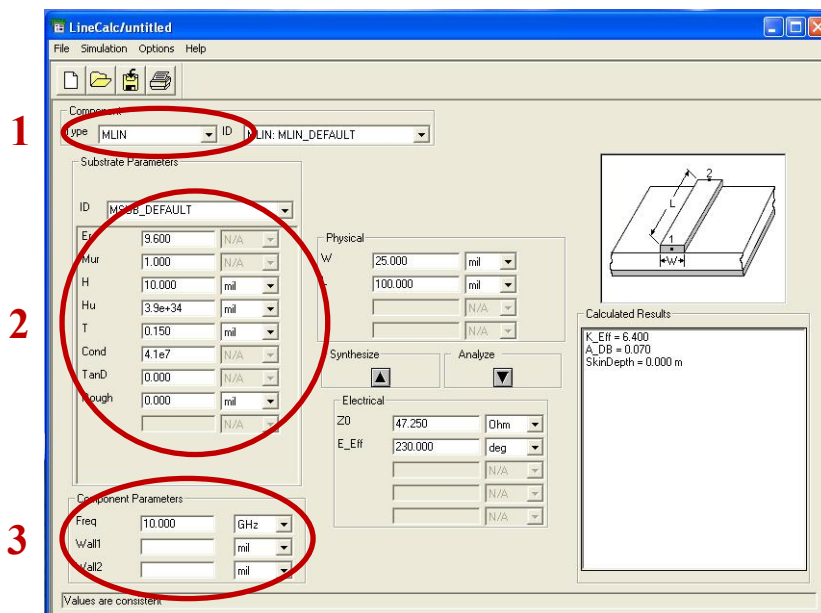


Cele două moduri de propagare (par/impar) se orientează diferit în interiorul dielectricului și în aer ca urmare cele două moduri vor fi caracterizate de impedanțe caracteristice diferite. Modelul, inclusiv pentru linii cuplate ideale este diferit pentru a ține cont de acest lucru.



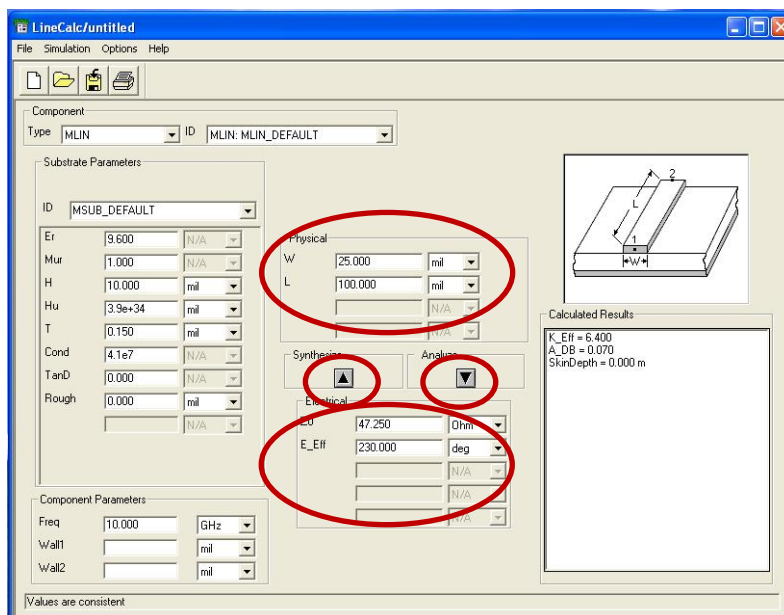
Analiza liniilor planare în ADS

Deoarece utilizarea relațiilor (empirice) prezentate anterior este laborioasă și incomodă, aproape toate programele de simulare au instrumente utile pentru implementarea lor. ADS are utilitarul numit Linecalc. Pentru pornirea acestuia este necesară deschiderea unui proiect ADS anterior sau crearea unuia nou. În oricare din scheme în meniu e disponibil: **>Tools>LineCalc>Start LineCalc**. Utilitarul poate fi utilizat pentru a obține o legătură între mărimile fizice ale unei linii (lungime/lățime traseu), pe/în un anumit substrat, și caracteristicile electrice importante (impedanță/e caracteristică și lungime electrică).

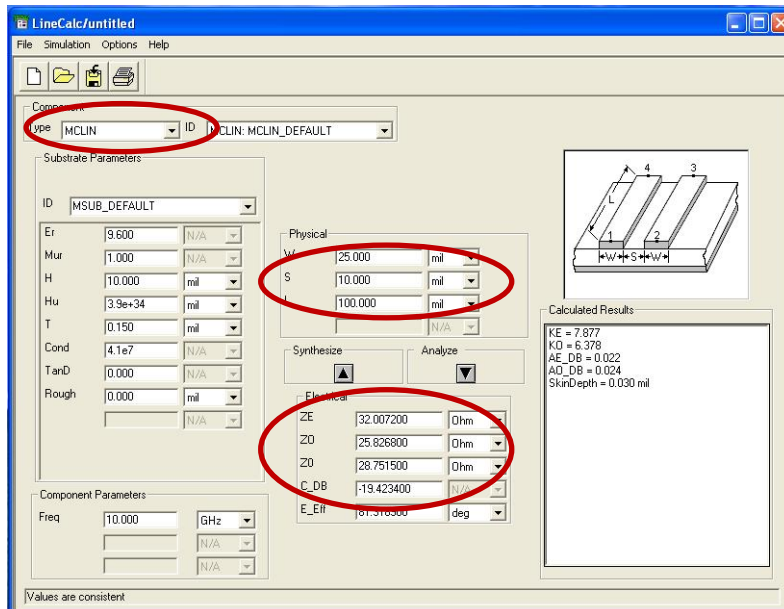


Se alege tipul de linie care se dorește a se analiza (în lucrarea de astăzi MLIN - linii microstrip sau MCLIN - linii microstrip cuplate). Se introduc apoi caracteristicile de substrat: ϵ_r , $\tan\delta$, conductivitate metalării (se comunică în laborator). Frecvența de lucru se fixează la 10GHz.

În continuare se poate trece de la caracteristici fizice la cele electrice și invers utilizând butoanele "Analyze" respectiv "Synthesize". Atenție la unitățile de măsură care pot fi alese pentru mărimi: mil/um/mm etc.



Similar se lucrează cu liniile cuplate, diferența constând în apariția unei dimensiuni fizice suplimentare (S: distanța dintre cele două linii) și a unor parametri electrice specifici, un coeficient de cuplaj, impedanța caracteristică pentru modul par (ZE) și impar (ZO).



Activitate în laborator

Pentru caracteristicile comunicate pentru substrat (diferite pentru fiecare grupă) trebuie investigată dependența parametrilor electrici de cei fizici.

Ca urmare se modifică parametrii fizici încercându-se obținerea unor grafice similare cu cele din figurile următoare:

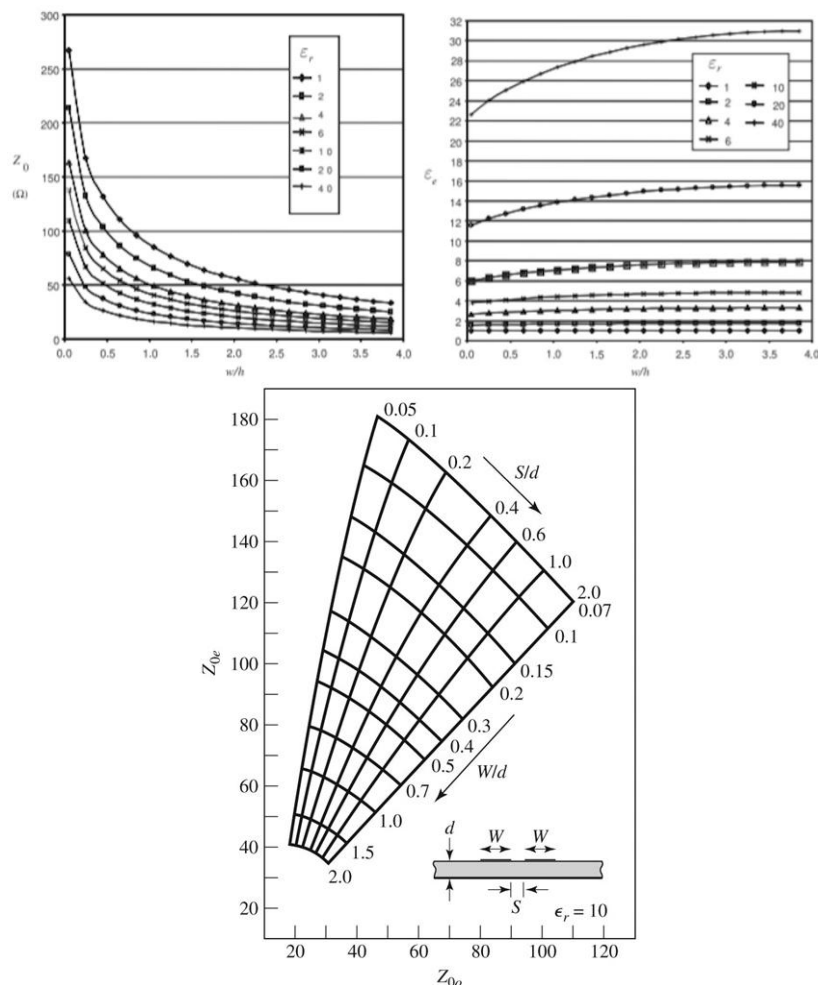


Figure 7.30
© John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

Depunere rezultate pe server

Dacă această acțiune este activă, se depun pe server-ul laboratorului 3 imagini care conțin cele trei grafice de la pasul anterior $\epsilon_{\text{eff}}(W/H)$, $Z_0(W/H)$ pentru linia microstrip și utilitarul de calcul pentru Z_{0E} , Z_{0O} ($W/H, S/H$)

