

Laborator 3

Exemplu de proiectare de circuite pasive în structuri integrate utilizând exemple de circuite

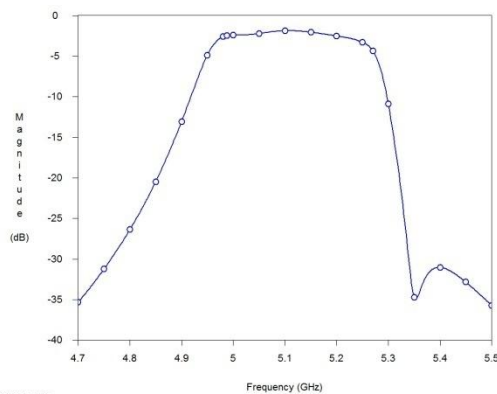
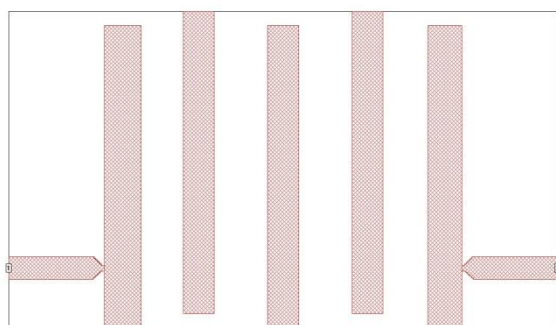
Tema de proiectare

Să se realizeze un filtru trece bandă, în tehnologie microstrip, utilizând o structură cu rezultate cunoscute, prezentată în literatură.

Relații utilizate

Se alege utilizarea unei structuri tipice de filtru interdigital. Un astfel de circuit este prezent între fișierele Sonnet, în secțiunea exemple, proiectul "filtwall.son". Acest filtru este realizat pe un substrat din alumina (Al_2O_3 - $\epsilon_r = 9.8$, $\tan \delta = 10^{-4}$) cu grosimea de 15 mil. Se folosesc 5 secțiuni de linie de transmisie (dimensiuni 22/24/26mil×214mil) spațiate cu 30/32/38mil (pentru detalii deschideți fișierul exemplu).

Caracteristicile acestui filtru sunt prezentate în figura următoare, banda obținută fiind între 4.95GHz - 5.3GHz cu atenuare înafara benzii foarte bună (atenuare > 30dB la 4.75GHz și 5.35GHz). Aceleași performanțe vor fi dificil de realizat pe un substrat de circuit integrat (se reamintește că alumina este un dielectric foarte bun utilizat în circuitele integrate în timp ce substratul în circuitele integrate monolitice este un material semiconductor)



Trecerea la structura de circuit integrat aduce câteva deosebiri esențiale care modifică total comportamentul și forma circuitului:

- schimbarea unităților de măsură în sistemul internațional (dacă în proiectarea pe substrat dielectric – alumina – se utilizează câteodată unitățile englezești datorită înălțimilor standard ale substratelor, în proiectarea circuitelor integrate se lucrează în unitățile caracteristice "foundry"-ului utilizat, în cazul acesta SI)

- 1 mil = 10^{-3} inch = 25.4 μm
- Modificarea caracteristicilor substratului (Se poate utiliza materialul din biblioteca Sonnet standard: $\epsilon_r = 12.9$, $\tan \delta = 6 \times 10^{-3}$, $\sigma \approx 0$) și a înălțimii acestuia ($h = 200 \mu\text{m}$)
- Modificarea liniilor microstrip. Caracteristicile care se modifică sunt ϵ_{eff} și Z_0 . Pentru calcularea noilor valori există relații precise de calcul, dar se pot utiliza câteva metode mai rapide de proiectare:
 - tabele/grafice de proiectare (la sfârșitul acestui document).
 - programe de calcul (Exemplu Tools->Line Calc în ADS 2003)
 - pentru acces facil, cu riscurile de rigoare, calculatoare on-line
 - <http://www.microwaves101.com/encyclopedia/calmstrip.cfm> – calcul aproximativ
 - <http://mcalc.sourceforge.net/> - calcul după relații mai precise

În general, regula de bază este modificarea lățimii traseelor pentru a păstra nemodificată impedanța caracteristică pe noul substrat, urmat de modificarea lungimii pentru a păstra lungimea electrică constantă ($\beta \cdot l$).

Pentru scalarea lungimilor se reamintesc câteva relații de bază. Funcționalitatea circuitului nu depinde în general de dimensiuni în mărimi absolute, ci de raportul între dimensiune și lungimea de undă. Pentru a păstra funcționalitatea la modificări de structură/material (cum este cazul în această temă) trebuie păstrat un raport l/λ constant ținând cont de lungimea de undă diferită, la aceeași frecvență. Dacă în plus trebuie modificate și frecvențele de lucru, se introduce o scalare suplimentară.

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r} \cdot f}$$

Pentru circuitul inițial realizat pe Alumină:

$$k_{Al} = \frac{l_{Al}}{\lambda_{Al}} = \frac{l_{Al}}{c_0} \cdot \sqrt{\epsilon_{rAl}} \cdot f_{Al}$$

Pentru circuitul realizat pe GaAs:

$$k_{GaAs} = \frac{l_{GaAs}}{\lambda_{GaAs}} = \frac{l_{GaAs}}{c_0} \cdot \sqrt{\epsilon_{rGaAs}} \cdot f_{GaAs}$$

Păstrarea raportului constant introduce un coeficient de scalare a dimensiunilor:

$$k = \frac{l_{GaAs}}{l_{Al}} = \frac{\sqrt{\epsilon_{rAl}} \cdot f_{Al}}{\sqrt{\epsilon_{rGaAs}} \cdot f_{GaAs}}$$

În aceste relații ϵ_r trebuie privit ca fiind ϵ_{eff} pentru liniile microstrip corespunzătoare, dependent de materialul de substrat și de lățimea traseelor (ϵ și w/h).

Exemplu

Să se realizeze un filtru trece bandă, în tehnologie microstrip, cu frecvența centrală la 6.0 GHz, utilizând o structură existentă în literatură (exemplu Sonnet "filtwall.son"). Se va utiliza programul Sonnet pentru simulare.

Activitate pregătitoare

Înainte de simularea structurii, este **esențială** o etapă preliminară de calcul în care instrumentele principale vor fi creionul și hârtia, cu suport teoretic anterior asigurat de studiile de geometrie (plană în cazul Sonnet, în spațiu la utilizarea unui program de simulare 3D).

Pentru prima secțiune de linie din filtrul interdigital: dimensiuni 26×214mil pe substrat alumina ($\epsilon_r = 9.8$, $\tan \delta = 10^{-4}$) cu grosimea de 15 mil impedanța caracteristică a liniei este (Line Calc din ADS):

$$Z_0 = 36.58\Omega, \quad \epsilon_{\text{eff}} = 7.025$$

Pentru obținerea aceleiași impedanțe caracteristice pe noul substrat GaAs ($\epsilon_r = 12.9$, $\tan \delta = 6 \times 10^{-3}$, $\sigma \approx 0$, $h = 200\mu\text{m}$) lățimea liniei trebuie să fie $275.75\mu\text{m}$ condiție în care se obține $\epsilon_{\text{eff}} = 8.853$.

În aceste condiții lungimea secțiunii de linie trebuie să fie:

$$l = \frac{(214 \cdot 25.4)\mu\text{m} \cdot \sqrt{7.025} \cdot 5.15\text{GHz}}{\sqrt{8.853} \cdot 6\text{GHz}} = 4156.06\mu\text{m}$$

Celelalte secțiuni de linie au aceeași lungime, dar lățimile sunt de 22mil (3 linii) și 24mil (ultima linie) care devin prin aceeași metodă de proiectare $230.23\mu\text{m}(40.27\Omega)$ și $252.93\mu\text{m}(38.32\Omega)$.

Pentru liniile de intrare/ieșire se obține o impedanță caracteristică $Z_0 = 47.7\Omega$. Se remarcă adaptarea dorită cu porturile de 50Ω . Lățimea corespunzătoare pe GaAs va fi de $162\mu\text{m}$ iar lungimea de $1320\mu\text{m}$.

Spațiile dintre "degete" (secțiuni de linie) sunt de 30/38/38/32mil devenind cu scalarea în distanță menționată anterior $582.62/737.99/737.99/621.47\mu\text{m}$. Degetele 2 și 4 sunt deplasate cu 10mil față de celelalte, distanță care devine $194.21\mu\text{m}$.

În aceste condiții putem determina dimensiunile volumului de calcul (Box Size în Sonnet):

- X: $4156.06 + 194.21 = 4350.27\mu\text{m}$

- $Y: 2 \cdot 1319.56 + 275.75 + 3 \cdot 230.23 + 252.93 + 582.62 + 2 \cdot 737.99 + 621.47$
 $= 6538.56\mu\text{m}$

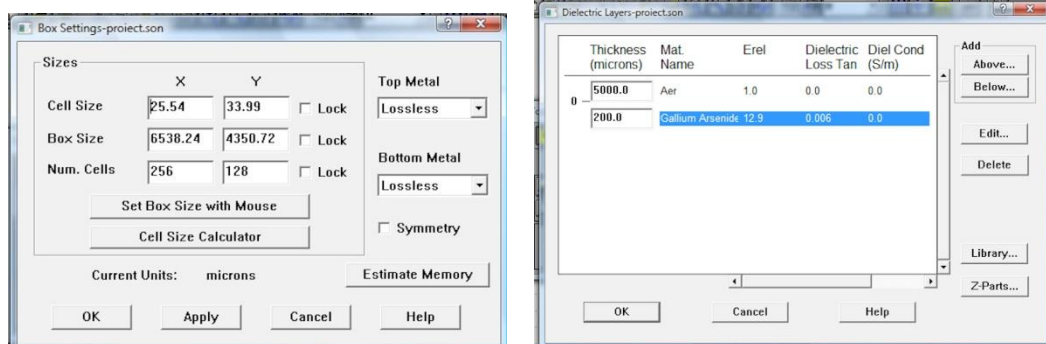
În acest moment se poate realiza desenarea schemei. E recomandat ca la desenarea poligoanelor să se încerce, pe cât posibil, ca fiecare poligon să acopere un număr întreg de celule. Acest lucru se poate asigura alegând o anumită discretizare a cutiei, urmând ca fiecare dimensiune să fie modificată la cel mai apropiat multiplu al dimensiunii celulei. Estimarea unui număr suficient de celule în acest pas este dificilă, dar din nou putem face apel la caracteristicile structurii exemplu. Aici întreaga structură cu dimensiunile $390 \times 224 \text{mil}$ a fost discretizată cu celule $2 \times 2 \text{mil}$ (195×112 celule) de unde și dimensiunile "întregi și pare" ale structurii inițiale. La alegerea dimensiunii celulelor trebuie să se țină seama și de caracteristicile tehnologice. În cazul de față, considerăm Plessey Foundry F20 utilizat și la curs, caz în care liniile vor fi implementate în stratul de metalizare M3, cu dimensiunea minimă implementabilă $10\mu\text{m}$ și un control al lățimii (precizie) de $1\mu\text{m}$. În aceste condiții nu se obțin avantaje decisive din utilizarea a prea multe zecimale în determinarea caracteristicilor celulei. Vom alege ca dimensiuni inițiale ale celulei $C_x \times C_y = 25.54\mu\text{m} \times 33.99\mu\text{m}$ care asigură o diviziune inițială 256×128 celule apropiată de cea din proiect.

	Inițial (alumină) [mil]	Calculat (GaAs) [μm]	Număr celule X×Y	Dimensiuni proiect [μm]
Cutie	390×224	6538.56×4350.27	256×128	6538.24×4350.72
Linii in/out	16/68	162/1320	52×5	169.95/1328.08
Distanță Y intrare	34	660.31	-×19	645.81
Distanță Y degete	10	194.21	-×6	203.94
Deget1	26/214	275.75/4156	11×122	280.94/4146.78
Deget2-4	22/214	230.23/4156	9×122	229.86/4146.78
Deget5	24/214	252.93/4156	10×122	255.4/4146.78
Spațiu1-2	30	582.62	23×-	587.42
Spațiu2-4	38	737.99	29×-	740.66
Spațiu4-5	32	621.47	24×-	612.47
Suma			257×128	6563.78×4350.72

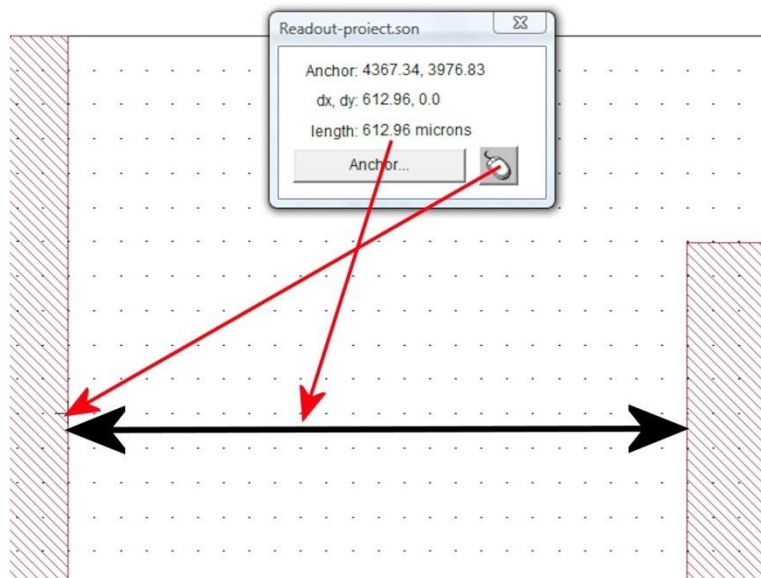
Se constată că suma de control a numărului de celule pe distanța X este 257 datorită rotunjirilor ceea ce va implica faptul că una dintre liniile de intrare/ieșire va fi reprezentată pe 51 de celule lungime în loc de 52.

Desenare structură

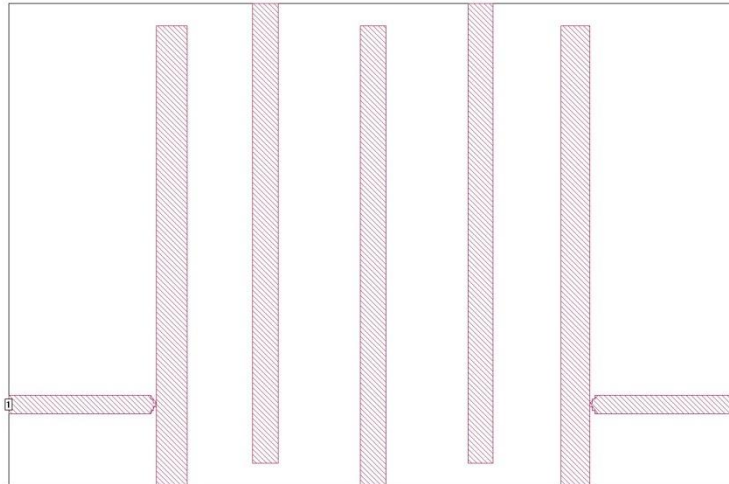
Se realizează noul proiect completând datele corespunzătoare ale unităților (Circuit→Units), cutiei (Circuit→Box) și straturilor de dielectric (Circuit→Dielectric Layers).



Urmează desenarea efectivă a circuitului. În acest pas se vor folosi indicațiile Sonnet în bara de stare (dimensiunile curente ale poligoanelor desenate) și se va folosi **intens** facilitatea de măsurare pusă la dispoziție (View→Measuring Tool) pentru a poziționa corect poligoanele. Se recomandă desenarea inițială a unor dreptunghiuri urmând ca unde este nevoie (în acest caz la liniile de intrare/ieșire care se îngustează treptat la atingerea primului/ultimului deget) să se adauge puncte care apoi să fie deplasate unde este nevoie. E obligatoriu ca opțiunea de fixare în nodurile grilei să fie selectată la nodurile rețelei (Tools→Snap Setup) pentru a avea o precizie mai bună de calcul.

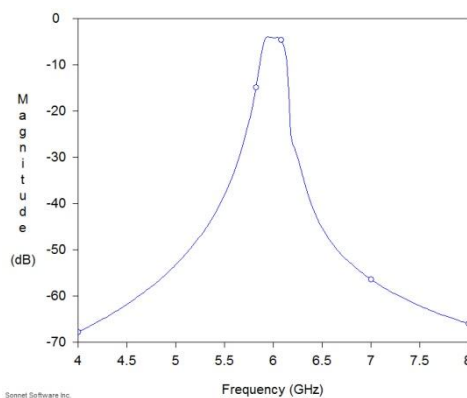


Pe desenul realizat se observă faptul că liniile sunt mai subțiri decât în cazul precedent și de asemenea la distanțe mai mari (datorită în primul rând modificărilor substratului).

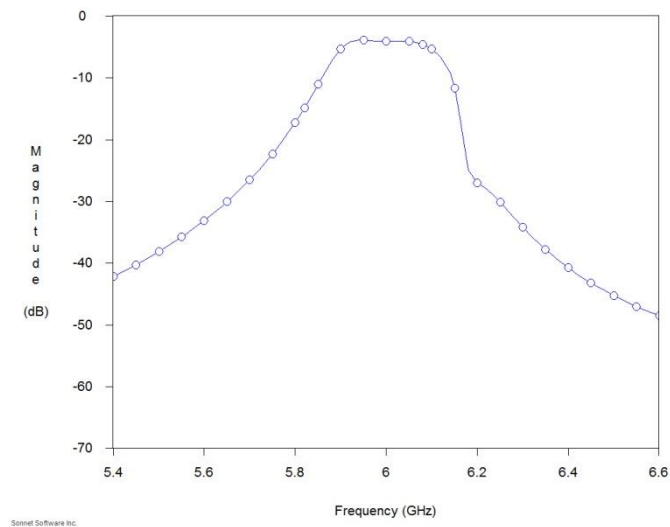


Simulare

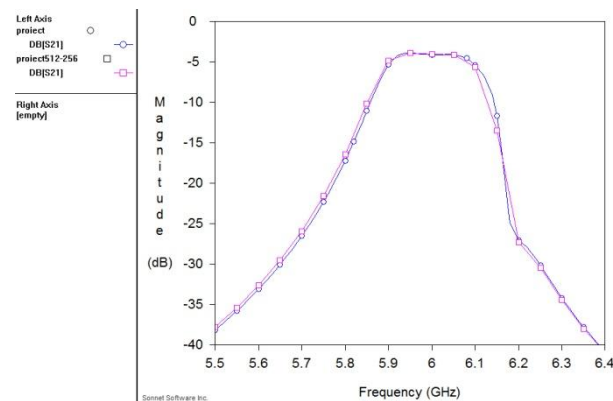
Se realizează o primă analiză (recomandat Analysis→Setup→Adaptive Sweep pentru o viteză de calcul mai mare) pentru verificarea corectitudinii calculelor geometrice.



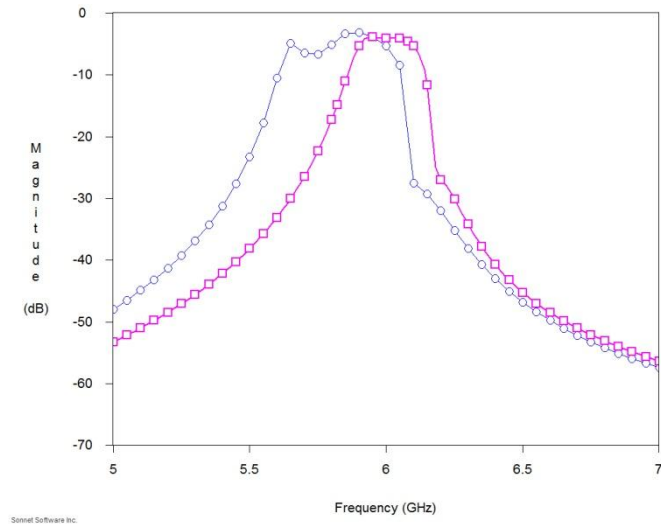
Dacă rezultatul arată îndeplinirea cerințelor (cum e cazul aici) se poate efectua o analiză mai precisă Analysis→Setup→Linear Frequency Sweep care efectuează calculul în mai multe puncte.



Este obligatorie în continuare efectuarea unei analize de convergență prin micșorarea dimensiunilor celulelor, cu scopul de a observa dacă analiza realizată este destul de fină. Se realizează relativ ușor o înjumătățire a celulelor pe ambele dimensiuni (mărire de 4 ori a numărului de celule) în secțiunea Circuit→Box selectând Lock în secțiunea Box Size și măbind (dublare sau eventual mai mult dacă este nevoie) numărul de celule. În cazul acestui circuit, calculul cu 512×256 celule nu aduce un spor de precizie lucru care se poate observa prin suprapunerea celor două grafice (ținând cont că estimarea inițială a fost "împrumutată" e normal să fie suficient de bună).



În sfârșit se prezintă posibilitatea de a afecta (în anumite limite!!!) funcționarea filtrului prin modificarea lățimii degetelor și a distanțelor dintre ele pentru a afecta cuplajul. Se prezintă situația obținută pentru linii mai late, cu efectul măririi benzii de trecere după cum se observă la comparația cu cazul anterior. Totuși, mărirea lățimii liniilor ar trebui însoțită de o mărire corespunzătoare a cutiei, pentru a păstra frecvența centrală dorită.



Activitate independentă

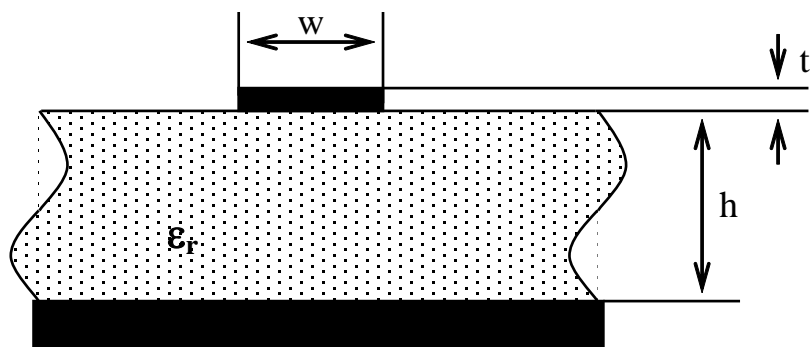
Să se realizeze un filtru trece bandă, în tehnologie microstrip, cu frecvența centrală la o altă frecvență decât cele specificate (de exemplu 7.0 GHz).

Supliment teoretic (opțional)

Relații de calcul pentru linii

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.

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

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

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

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

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

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

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_{\text{ef}0}}{1 + P} \quad (11)$$

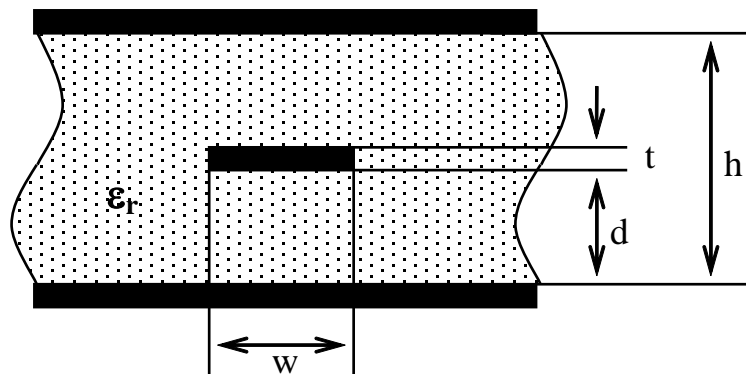
$$Z_{0f} = Z_0 \left(\frac{\epsilon_{\text{ef}0}}{\epsilon_{\text{eff}}} \right)^{0.5} \frac{\epsilon_{\text{eff}} - 1}{\epsilon_{\text{ef}0} - 1} \quad (12)$$

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 (figura 3.)



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/ft^2) cu $1oz=28.35g$ și $1ft=30.48cm$. Grosimile standard și exprimarea în oz/ft^2 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. Fiecare firmă producătoare oferă anumite valori ale grosimii dielectricului cum ar fi: 0.38mm, 0.44mm, 0.50mm, 0.79mm, 1.57mm, 3.18mm în cazul firmei Rogers Corporation.

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

1. Materiale plastice (organice)
2. 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 (sticla). 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 alumină are o valoare foarte mică, de asemenea coeficienții 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:

Material	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 quartz	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	-

	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
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 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).