Circuite Integrate Monolitice pentru Microunde

Proiect

Tema de proiectare

Se proiectează circuite pasive realizate în tehnologia prezentată la curs (Plessey). Se folosește Sonnet pentru simulare electromagnetică și Microwave Office pentru simulare de circuit. La sfârșitul semestrului se predă un material care să descrie componenta implementată, analiza de convergență, schema echivalentă și detaliile tehnologice - nr. de straturi/model metal etc. - (format hard sau electronic pdf/doc) **împreună cu** fișierele care implementează proiectul în **Sonnet** (cel mai precis proiect din analiza de convergență, proiect <u>functional</u> - fișierul _X_.son + subdirectorul corespunzător _X_ din directorul "sondata", versiunea prezentă în laborator, sau ultima versiune evaluativă disponibilă online <u>http://www.sonnetsoftware.com/</u>) <u>și Microwave Office</u> (NI AWRDE) fișierele *.emp, *.vin și subdirectoarele din "DATA_SETS" corespunzătoare.

Fiecare temă va conține dimensiuni fizice pentru următoarele componente:

- bobină spirală pătrată, celulă standard
- condensator planar (sandwich) cu poliimidă (PI)
- condensator planar (sandwich) cu nitrură de siliciu (Si)

Fiecare student va alege din tema proprie o <u>singură</u> componentă pentru a o analiza, ținând cont de nota maximă pentru fiecare componentă (tabelul următor).

Nr.	Tip componentă	Nota
		maximă
1	Bobină	8
2	Condensator PI	6
3	Condensator Si	7

Tabel 1. Teme de proiectare

Pentru compensarea notei maxime (eventual) mai mici de 10 se poate beneficia de unul din următoarele bonus-uri:

Nr.	Descriere	Bonus	Detalii
1	Utilizare structură cu trei straturi (GaAs+PI+aer)	0	
2	Utilizare structură cu cinci straturi (GaAs+Si+PI+Si)	+0.5	Fig. 7a
3	Utilizare structură cu nouă straturi (GaAs+Si+PI+Si)	+1	Fig. 7b
4	Utilizare metal ideal	0	
5	Utilizare model "Normal metal"	+0.5	Fig. 2
6	Utilizare model "Thick metal" (min. 4 nivele)	+2	Fig. 3,4
7	Utilizare model "Dielectric Brick"	+1	Fig. 6,7b

Tabel 2. Punctaj suplimentar

Note:

- Modele mai complicate presupun creșterea considerabilă a timpului de calcul și a memoriei necesare.
- Unele combinații temă/bonus nu sunt posibile. De exemplu: capacitate pe siliciu cu model "Thick metal" pentru metalizări implică automat utilizarea modelului "Dielectric Brick", sau utilizare două straturi (GaAs+PI) se poate aplica doar pentru bobină și condensator PI
- Toate componentele implică utilizarea a două nivele de metalizare (M2 și M3) și implică apariția trecerilor între nivele (via-holes)

Straturile de materiale implicate sunt reprezentate simplificat în figura 1, indicându-se de asemenea suprafețele pe care se depun cele două niveluri de metalizare M2 și M3 (nitrura de siliciu se depune deasupra acestor metalizări pentru a evita conexiuni electrice nedorite). În tabelul 3 sunt prezentate caracteristicile materialelor utilizate.



Fig. 1. Straturi dielectrice

Nr.	Material	ε _r	tan δ	$\sigma[S/m]$	$R_{sq}[m\Omega/sq]$	h[µm]
1	GaAs	12.85	$0.3 \cdot 10^{-3}$			200
2	Si ₃ N ₄	7.2	$15 \cdot 10^{-3}$			0.13
3	PI	3.4	$55 \cdot 10^{-3}$			1.8
4	M2			$3.6 \cdot 10^7$	55	0.5
5	M3			$3.3 \cdot 10^7$	10	3

Tabel 3. Caracteristici materiale utilizate

Pentru descrierea metalizărilor există mai multe nivele de detalii introduse, care sunt recompensate prin bonus-uri diferite (tabelul 2). În primul rând modelul utilizat în Sonnet poate fi:

- Metal Ideal (Lossless), pierderi nule, înălțime egală cu 0
- Modelarea pierderilor (Normal Metal), cu mărimile introduse fiind cele din figura 2: σ, h și raportul de curenți între suprafața de sus și cea de jos a conductorului. Pierderile sunt modelate prin rezistențe de suprafață, raportul de curenți depinzând de tipul de linii introduse. Pentru linii microstrip acest raport este tipic 1.5. În structura geometrică înălțimea introdusă este 0 (valoarea introdusă în model e utilizată strict la calcularea impedanțelor de suprafață).

 Modelarea pierderilor şi a înălțimii liniei (Thick metal), cu mărimile introduse fiind cele din figura 3: σ, h şi numărul de nivele de metalizare introduse pentru simularea înălțimii. În structura geometrică înălțimea introdusă este cea indicată şi Sonnet realizează automat secționarea stratului dielectric de deasupra pentru a introduce efectiv folii metalice în structură (fig. 4). Se obțin astfel câteva (NumSheets -1) suprafețe suplimentare, şi câteva straturi suplimentare care permit modelarea mai bună a înălțimii liniei, cu creșterea corespunzătoare a timpului de calcul şi a memoriei necesare, ca urmare se recomandă creșterea graduală a numărului de nivele (2 - 4 - 6) cu urmărirea necesarului de memorie şi cu realizarea unei analize de convergență. În această situație metalizarea se extinde pe verticală şi intră în stratul dielectric de deasupra.

Name	М3		Pattern	÷
Туре	Normal	•		
C	nductivity	33000000	Sim	
	Judecarity	55000000.0	of its	
Т	hickness *	3.0	microns	3
Cu	rrent Ratio	1.5		

Fig. 2. Modelarea pierderilor (Normal metal model)

- F			000000000000000000000000000000000000000
туре	hick Metal Model	•	
Conc	luctivity 33000000.0		S/m
Thic	kness * 3.0		microns
Num.	Sheets 16		

Fig. 3. Modelarea grosimii metalizării (thick metal model)





Fig. 5. Geometria reală în circuitul integrat

Utilizarea modelului "thick metal" oferă apropierea cea mai mare de situația reală (fig. 5). Suplimentar, înălțimea stratului de pasivizare cu nitrură de siliciu este mai mică decât a metalizărilor implicate (0.13µm față de 0.5/3µm) ceea ce aduce o dificultate suplimentară la modelarea cu precizie a depunerii nitrurii de siliciu **pe** metalizare. O modelare precisă impune introducerea unor straturi suplimentare și utilizarea modelului "Dielectric Brick". Elementul "Dielectric brick" în Sonnet introduce un paralelipiped dintr-un material dielectric în interiorul unui alt material dielectric, obligatoriu extins pe <u>întreaga</u> înălțime a stratului dielectric în care se realizează introducerea (fig. 6). Introducerea unui bloc dielectric trebuie însoțită de impunerea unei secționări pe verticală a stratului dielectric corespunzător "number of Z-partitions" (în meniu, Circuit -> Dielectric Layers -> buton Z-Parts...). Inițial valoarea este 0 pentru straturile "normale", fără blocuri dielectrice, dar trebuie crescut la minim 1 la introducerea unui astfel de bloc, cu creșterea corespunzătoare a timpului de calcul și a memoriei necesare, ca urmare se recomandă creșterea graduală a numărului de nivele (1 - 2 etc.) cu urmărirea necesarului de memorie și cu realizarea unei analize de convergență.



Fig. 6. Dielectric Brick în Sonnet

Pentru modelarea nitrurii de siliciu depusă pe metalizare e necesară introducerea suplimentară a 4 straturi prin împărțirea în trei secțiuni a straturilor de poliimid și aer (pentru a crea nivelele necesare între care să se extindă depunerile de pe metalizare - fig. 7).



Fig. 7. Modelarea pasivizării pe metalizare (5 straturi -> 9 straturi)

Simulările în Sonnet se realizează între 1 și 20GHz (corespunzător tehnologiei Plessey) și se obțin pentru utilizarea în analiza de circuit parametrii S pentru dispozitivul analizat. Parametrii S se obțin în aplicația Response Viewer unde pot fi afișați parametrii S, dar exista și optiunea exportării acestor parametri (în meniu, **Output** > **S,Y,Z Parameter File**) cu alegerea optiunilor: Format = Touchstone, Data Type = De-Embedded, Parameter = S-Param, Complex = Mag-Angle.

Note

• E obligatorie creșterea incrementală a complexității modelului ales (nr. de straturi, nr. de celule, model metal, introducere bloc dielectric, număr de nivele la metalizări și în

blocurile dielectrice), deoarece modelarea "completă" depășește cu mult resursele de timp și RAM pe care le aveți la dispoziție

- Modelarea componentei se face fără introducerea elementelor suplimentare inevitabile în practică, dar care sunt caracterizate de modele suplimentare: trecere M2/M3 pentru revenirea pe nivelul de metalizare M3, tranziții de la linia standard de conexiune (12/40µm) la linia utilizată în circuit, etc. (fig. 8,9).
- E necesară adăugarea opțiunii "Add reference planes" (neutilizată la laborator) pentru a asigura obținerea modelului componentei fără a introduce și liniile (de lungime variabilă) de acces (fig. 8,9).
- Dimensiunile celulelor standard sunt:
 - bobină: lățimea traseelor 12μm, spațiul între trasee 12μm, latura trecerilor 40μm, diametru trecere (via) M3-M2 circulară cu diametru 30μm, prima spiră din jurul trecerii are latura internă 76μm (fig. 9), linia de acces pe M3 are diverse orientări în funcție de numărul de sferturi de spiră din temă.
 - condensatoare: lăţimea liniilor de acces la armături (M2 şi M3) este de 40μm (fig. 8)
- Modelarea se încheie prin obținerea modelului de circuit pentru componentă. Această operațiune se realizează de mai multe ori pe parcursul realizării proiectului. Analiza de convergență presupune urmărirea variației unei mărimi numerice importante din structură, iar în cazul componentelor simulate această mărime va fi valoarea componentei (mărimea principală, fără componentele parazite, L sau C)



Fig. 8. Modelare condensator, plane de referință



Fig. 9. Modelare bobină, plane de referință

Modelarea în simulatorul de circuit se realizează în Microwave Office (NI AWR Design Environment, versiunea 11/32b sau 12/64b). În principiu pașii sunt:

- modelarea schemei echivalente pentru componentă, prezentată în slide-urile de la curs împreună cu relațiile necesare pentru a calcula valorile elementelor
- compararea rezultatului (parametri S) cu rezultatele obținute în Sonnet
- variația valorilor elementelor din schema echivalentă în vederea suprapunerii în banda largă (1-20 GHz) a celor două rezultate
 - \circ în cazul alegerii temei cu bobină există o rezonanță a parametrului S₂₁ la o frecvență în interiorul benzii tehnologiei (1-20 GHz). Suprapunerea modelelor se face numai până la 80-90% din această frecvență

În NI AWRDE majoritatea comenzilor pot fi introduse din meniu sau utilizând Project Browser (prezent in partea stângă a ferestrei - fig. 10). Indicațiile în continuare sunt prezentate cu utilizarea Project Browser.



Fig. 10. Project Browser

Pașii pentru implementarea modelării sunt următorii:

• Introducerea unei scheme: click dreapta pe "Circuit Schematics > New Schematic"

- Desenarea schemei: click "Elements" în partea de jos, în tab-ul Elemente se alege "Lumped Element" + "Capacitor/Inductor" iar apoi in jumătatea de jos se alege componenta ideală (Closed Form) corespunzătoare IND/CAP și cu drag/drop se depune pe schemă cu left . Right click înainte de a depune componenta implementează funcția rotire. E important să se aleagă componenta ideală și nu un model care include elemente parazite. Schema implementată realizează modelarea separată a elementelor parazite
- Masa şi porturile se regăsesc în bara de butoane din partea de sus a interfeței. Interconectarea elementelor se face punând cursorul mouse-ului deasupra unui terminal. Cursorul se modifică semnalizând poziționarea corectă, după care cu click se pornește desenarea firelor de legătură.
 - Atenție: are importanță poziționarea corectă a porturilor astfel încât să corespundă cu notația porturilor în Sonnet, mai ales la schemele asimetrice (bobină şi condensator PI). De exemplu în figurile 8, 11 portul 1 este pe M3 iar portul 2 este pe M2.



Fig. 11. Desenarea schemei echivalente pentru condensator PI

- Adăugarea unor ferestre de afişare a rezultatelor: right click "Project Browser -> Graphs
 > New Graph". Se creează grafice pentru S₁₁, S₁₂, S₂₁, S₂₂
- Se introduce în proiect fișierul cu parametri S obținut în Sonnet "Project Browser > Data Files > Import Data File" cu selecție "Touchstone files" (potrivit pentru *.s2p)
- Se ataşează la fiecare grafic mărimile de afişat: "Project Browser > Graphs > X > Add Measurement". Se alege "Port Parameters", "S", se selectează porturile corespunzătoare, se alege "Data Source Name" (care poate fi schema desenată sau fisierul de date introdus, în funcție de ce se dorește să se afișeze, sau ambele dacă se dorește o comparație)
- Specificarea caracteristicilor analizei, frecvenţe. Right click "Project Browser > Project Options > Frequencies" Se introduc valorile "Start, Stop, Step" şi se apasă butonul "Apply", verificând că opțiunea Replace este selectată.
 - E recomandabil să se respecte valorile indicate la analiza în Sonnet pentru a realiza o coincidență între punctele din AWRDE și cele din Sonnet
- Se simulează schema. Se vizualizează diferențele între parametrii S calculați de Sonnet și cei calculați de NI AWRDE pentru schema echivalentă. Valorile inițiale ale componentelor sunt calculate cu relațiile din curs.



Fig. 12. Compararea simulării de circuit cu simularea electromagnetică pentru condensator PI

Pentru variația parametrilor din schema echivalentă e necesară o analiză de optimizare.
 Primul pas constă în definirea valorilor care trebuie modificate. Lista totală a variabilelor prezente în schemă se obține din meniu: View > Variable Browser.

Descent	El	ID	D	14-1	T	O-Port	C	Laura	11	Our Char	Tee
Document	Element	ID	Parameter	Value	Tune	Optimize	Constrained	Lower	Upper	Step Size	Tag
Schema	RES	RES	R	1.5418							
Schema	CAP	C_M2	С	0.0673							
Schema	IND	L_M2	L	0.0186							
Schema	IND	L_M3	L	0.0375							
Schema	CAP	C_PRIME	С	0.8459							
Schema	CAP	C_M3	С	0.0101							
Schema	PORT	P2	Z	50							
Schema	PORT	P1	Z	50							
Variabl	es (Showi	ng 8 of 8)									•
■ Variabl	es (Showi	ng 8 of 8)	Parameter	Value	Tune	Ontimize	Constrained	lower	Upper	Step Size	Tao (
■ Variabl マ 2 nd [Document	es (Showi	ng 8 of 8) 🔁 🧖	Parameter	Value	Tune	Optimize	Constrained	Lower	Upper	Step Size	Tag
■ Variabl	es (Showi	ng 8 of 8) Constant ID RES	Parameter	Value 1.5418	Tune	Optimize	Constrained	Lower 0.1542	Upper 6.167	Step Size	Tag
Variabl 2 nd 2 nd Document Schema Schema	es (Showi Element RES CAP	ng 8 of 8) E ID RES C_M2	Parameter R C	Value 1.5418 0.0673	Tune	Optimize		Lower 0.1542 0.00673	Upper 6.167 0.2692	Step Size	Tag
Variabl 2 nd 2 nd Document Schema Schema Schema	es (Showi Element RES CAP IND	ng 8 of 8)	Parameter R C L	Value 1.5418 0.0673 0.0186	Tune	Optimize	Constrained V V	Lower 0.1542 0.00673 0.00186	Upper 6.167 0.2692 0.0744	Step Size	Tag
Variabl 2nd Document Schema Schema Schema Schema	RES CAP IND IND	ng 8 of 8) T ID RES C_M2 L_M2 L_M3	Parameter R C L L	Value 1.5418 0.0673 0.0186 0.0375	Tune	Optimize	Constrained V V V	Lower 0.1542 0.00673 0.00186 0.00375	Upper 6.167 0.2692 0.0744 0.15	Step Size	Tag
Variabl 2ng Document Schema Schema Schema Schema Schema	RES CAP IND CAP CAP	RES C_M2 L_M3 C_PRIME	Parameter R C L L C	Value 1.5418 0.0673 0.0186 0.0375 0.8459		Optimize	Constrained V V V	Lower 0.1542 0.00673 0.00186 0.00375 0.08459	Upper 6.167 0.2692 0.0744 0.15 3.384	Step Size	Tag
2ng 2ng 2 Document Schema Schema Schema Schema Schema Schema	RES CAP IND IND CAP CAP CAP	ng 8 of 8) D RES C_M2 L_M2 L_M3 C_PRIME C_M3	Parameter R C L L C C	Value 1.5418 0.0673 0.0186 0.0375 0.8459 0.0101		Optimize	Constrained V V V V	Lower 0.1542 0.00673 0.00186 0.00375 0.08459 0.00101	Upper 6.167 0.2692 0.0744 0.15 3.384 0.0404	Step Size	Tag
Variabl 2 nd 2 nd Document Schema Schema Schema Schema Schema Schema	es (Showi Bement RES CAP IND IND CAP CAP PORT	ng 8 of 8) ID RES C_M2 L_M2 L_M3 C_PRIME C_M3 P2	Parameter R C L L C C Z	Value 1.5418 0.0673 0.0186 0.0375 0.8459 0.0101 50		Optimize	Constrained V V V V	Lower 0.1542 0.00673 0.00186 0.00375 0.08459 0.00101	Upper 6.167 0.2692 0.0744 0.15 3.384 0.0404	Step Size	Tag

Fig. 13. Definirea variabilelor și a intervalului de variație

Se selectează mărimile care urmează a fi variate automat (Optimize) sau manual (Tune). În cazul optimizării automate este indicat să limităm intervalul de variație pentru variabile (coloana Constrained) și să specificăm limitele de variație pentru variabile. Limitele pot fi introduse ca valori absolute in coloanele Lower și Upper sau ca variație relativă față de valoarea nominală de pe coloana Value (de exemplu 10% se introduce sub forma "10%") sau ca variație absolută față de valoarea nominală (de exemplu +10 se introduce sub forma "10%") sau ca variație absolută față de valoarea nominală (de exemplu +10 se introduce sub forma "10#"). Dacă valoarea introdusă (ex.: 10, 10%, 10#) se introduce în coloanele Lower/Upper se completează numai acea coloană (ex.: N+10%N, N-10%N, N+10, N-10). Dacă valorile de interval (ex.: 10%, 10#) sunt introduse în colana corespunzătoare valorilor nominale Value, se completează automat ambele coloane Lower Upper cu o abatere egală față de valoarea nominală (absolută sau nominală, ex: ±10%, ±10). În exemplul din figura 13 la toate variabile s-a introdus un interval de -90%/+300%.

Indify Optimization Goal	Specify Measurement for Goal
Measurement Schema:SDeltaM(Sonnet, 2) Schema:SDeltaM(Sonnet, 2, 1, 2, 1, 1) Schema:SDeltaP(Sonnet, 1, 2, 1, 2) Schema:SDeltaP(Sonnet, 1, 2, 1, 1) Schema:SDeltaP(Sonnet, 1, 2, 1, 2) Schema:SDeltaP(Sonnet, 2, 1, 2, 1) Schema:SDeltaP(Sonnet, 2, 1, 2, 1) Schema:SDeltaP(Sonnet, 2, 1, 2, 2, 2) Schema:SDeltaP(Sonnet, 2, 1, 2, 1) Schema:SDeltaP(Sonnet, 2, 2, 2, 2) Schema:SDeltaP(Sonnet, 2, 1, 2, 1) Schema:SDeltaP(Sonnet, 2, 2, 2, 2) Schema:SDeltaP(Sonnet, 2, 1, 2, 1) Sonnet:DB(S(1, 1, 1)) Sonnet:DB(S(1, 2)) New/Edit Meas	Measurement Type Measurement Type Measurement Search Measurement Type Measurement Search Measurement Search Data Source Name Schema Schema Schema Data Source Name Schema Schema Schema T AC Gain Filder Phase Shifter Phase Shifter Phase Shifter Phase Shifter T Y Z Stability Error between S parameters
Goal Type Range Meas > Goal Start V Min Stop V Max Meas = Goal MIN GHz GHz Cost=Weight * Meas-Goal ^L Goal 0 unitless Weight 1	Enable goal Simulator Default Linear Configuration Default Configuration Default Complex Modifier Cancel Imag. Mag. Angle AngleU Complex Conjugate dB
Vuse default L L L	Help OK Cancel Help Favorite Meas Hel

Fig. 14. Definirea țintei procesului de optimizare

- Definirea unei ținte pentru algoritmul de optimizare automată se face: Right click "Project Browser > Optimizer Goals" (figura 14). New/Edit Meas permite introducerea mărimilor care vor fi controlate în procesul de optimizare. În NI AWRDE există o opțiune utilizabilă în cazul temei curente "Port Parameters > SModel"care acceptă ca parametri două seturi de parametri S (Data Source Name) şi calculează eroarea/diferența între cele două seturi, pentru toate porturile implicate, la toate frecvențele. Condițiile necesare sunt ca cele două seturi de parametri să corespundă aceluiaşi număr de porturi (2X2 în cazul nostru) şi să fie aibă acelaşi număr de puncte în frecvență determinate (de unde recomandarea anterioară de a fixa frecvențe identice în NI AWRDE şi Sonnet). De menționat că în anumite cazuri acest model de eroare nu dă rezultate corecte astfel încât trebuie compusă o condiție de coincidență utilizând SDeltaM (diferență de modul), SDeltaP (diferență de fază) pentru unul sau mai mulți din parametrii S corespunzători.
- Se poate defini intervalul de frecvențe în care se face optimizarea, tipul de condiție care trebuie îndeplinită, se introduce o valoare numerică pentru țintă. În cazul nostru (figura 14) e potrivită fixarea unei ținte egală cu 0 și o condiție de egalitate între mărimea controlată și țintă. De menționat că în unele cazuri (abatere mare între seturile inițiale de

parametri S) e posibil să apară necesitatea introducerii unor multiple relații de tipul Abs (SDeltaM) < 1e-3 (sau echivalente).

Se pornește algoritmul de optimizare din meniu: "Simulate > Optimize". Se afișează fereastra programului de optimizare din care se poate alege numărul de iterații, algoritmul utilizat (Random e suficient în acest caz deoarece optimizarea nu durează excesiv de mult). Se poate porni/opri optimizarea, se poate salva setul de parametri de la un moment dat și se poate reîncărca unul salvat anterior sau setul inițial (numai până la închiderea ferestrei de optimizare, după aceasta valorile finale sunt trimise în schemă). Se poate urmări valoarea erorii instantanee (Cost) și cum descrește aceasta în decursul timpului.

Optimizer		
Optimization Methods	Relative Goal Cost	Cost History
Random (Global)		
Maximum Iterations	Equalize Goals Optimizer Iter. = 2807	
Stop at ininimum error Stop at ninimum error Cancel current iteration on stop re- Start Stop Reset Sav	Cost = 1.94675e-008 quest re Revert Status Round Vars Help	
Optimizer 👼 Goals 🖃 Varia	ble History 🛛 🖾 Goal History 🛛	

Fig. 15. Fereastra programului de optimizare

• E utilă afișarea în același timp a ferestrei cu lista variabilelor, deoarece pe acesta se semnalează situațiile în care programul de optimizare a atins limitele impuse de variație pentru variabile (fundal roșu) sau este foarte aproape (fundal galben), caz în care se impune modificarea limitelor respective pentru a putea obține o optimizare corectă (figura 16)

7 2 nd											
Document	Element	ID	Parameter	Value	Tune	Optimize	Constrained	Lower	Upper	Step Size	Tag
Schema	RES	RES	R	1.5857413		~	~	0.3855	2.698		
Schema	CAP	C_M3	С	0.00254015		~	~	0.002525	0.01768		
Schema	CAP	C_M2	С	0.0588202		~	~	0.01683	0.1178		
Schema	CAP	C_PRIME	С	0.867502925		~	~	0.2115	5		
Schema	IND	L_M3	L	0.0445875		~	~	0.009375	0.06563		
Schema	IND	L_M2	L	0.03255		~	~	0.00465	0.03255	0	
Schema	PORT	P1	Z	50					1		
Schema	PORT	P2	Z	50							

Fig. 16. Atingerea limitelor de variație a variabilelor

• După atingerea unei erori scăzute se poate verifica potrivirea între seturile de parametri S și se poate obține din schemă valorile finale pentru componente



Fig. 18. Valorile optimizate din schema echivalentă pentru condensator PI

Exemplu de proiectare

Să se proiecteze un condensator planar (sandwich) cu poliimidă cu latura armăturii de X µm.

Se încearcă obținerea notei maxime, deci la nota de bază 6p se adaugă bonus-urile pentru "Utilizare structură cu nouă straturi" (+1p, Fig. 7b), "Utilizare model Thick metal" (+2p, Fig. 3,4) și "Utilizare model Dielectric Brick (+1p, Fig. 6,7b).

Se desenează structura în Sonnet conform indicațiilor anterioare. Structura de bază va fi cea corespunzătoare complexității maxime țintite (Fig. 7b), fiind relativ ușor de eliminat straturi, blocuri dielectrice, modificat model de metal pentru a realiza analize simplificate.

O primă alegere care trebuie realizată este cea a dimensiunii celulei, deoarece desenarea se face prin nodurile unui grilaj existent. În acest moment trebuie ținut cont de cum va fi modificată celula pe viitor, deoarece la modificarea celulei se schimbă și grilajul asociat, și e mai comod ca structura desenată să se potrivească și cu grilajele viitoare, evitând astfel desenarea din nou a structurii de fiecare dată.

Se alege celula cea <u>mai mare preconizată</u> a fi utilizată ca divizor al laturii armăturii și a altor dimensiuni din structură, chiar dacă numerele rezultate nu vor fi tocmai "rotunde". În continuare orice înjumătățire a celulei va păstra desenul ancorat pe grilaj.



Fig. 19. Alegerea dimensiunii maxime a celulei

$$\frac{X}{C_0} = k \in N \quad \frac{A}{C_0} = l \in N \quad \frac{B}{C_0} = m \in N \quad \frac{D}{C_0} = p \in N \quad \frac{E}{C_0} = q \in N \quad \frac{F}{C_0} = r \in N$$
$$C_i = C_0 \cdot 2^{-i} \longrightarrow \frac{X}{C_i} = \frac{X \cdot 2^i}{C_0} = k' \in N \quad \frac{A}{C_i} = l' \in N \quad \frac{B}{C_i} = m' \in N \quad \cdots$$

Dacă structura o impune, celulele nu trebuie neapărat să fie pătrate, discuția fiind similară dar separată pe cele două direcții, apărând două grade de libertate suplimentare $(C_0 \rightarrow C_0^x, C_0^y; i \rightarrow i, j)$:

$$\frac{X}{C_0^x} = k \in N, \frac{A}{C_0^x} = l \in N, \frac{B}{C_0^x} = m \in N, \frac{F}{C_0^x} = p \in N \quad \frac{X}{C_0^y} = q \in N, \frac{D}{C_0^y} = r \in N, \frac{E}{C_0^y} = s \in N$$
$$C_i^x = C_0^x \cdot 2^{-i}; \quad C_j^y = C_0^y \cdot 2^{-j}; \quad i, j \in N$$

Se reamintește puterea "magică" a puterilor lui 2 în ceea ce privește alegerea unei dimensiuni inițiale. Se recomandă îndeplinirea, dacă e posibil, ca fiecare din valorile întregi ale rapoartelor

din relațiile anterioare (k, l, m, p, q, r, s) să fie o putere a lui 2. În acest caz, dacă alegerea inițială se dovedește a fi prea mică, este posibilă dublarea dimensiunii celulei de un număr de ori (variabil) cu păstrarea condiției de ancorare a desenului structurii pe nodurile grilajului.

$$\frac{X}{C_0} = k = 2^t \to C_i = C_0 \cdot 2^i \to \frac{X}{C_i} = \frac{X}{C_0 \cdot 2^i} = \frac{2^t}{2^i} = k' \in N; \quad \forall i < t \quad \cdots$$

Regulile amintite creează o serie geometrică pentru dimensiunile celulei, utilizând 2 ca bază. Orice număr întreg poate fi folosit ca bază, dar utilizarea unui număr mai mare duce la obținerea unei scăderi a celulei mult prea rapidă care crește prea brutal memoria și timpul necesare pentru analiză (ex: 1,2,4,8,16... / 1,3,9,27,81...)

Notă importantă: Sub nici un motiv **nu** se dezactivează opțiunea Snap (din meniu Tools > Snap Setup sau - mai ușor de apăsat din greșeală - din butonul din bară). Dacă nu se poate desena dimensiunea dorită pe grilajul curent, e un semn că alegerea inițială a celulei a fost greșită.

Pentru schema realizată se alege celula cea mai mare de dimensiune 8μ m, pătrată, cu îndeplinirea condițiilor anterioare. Vom putea apoi micșora celula prin înjumătățire (4μ m, 2μ m, 1μ m, 0.5μ m) fără a mai fi necesară redesenarea structurii. Se utilizează frecvent comanda View > View 3D pentru a verifica poziționarea corectă a elementelor (Fig. 20 - după direcția Z scala este exagerată pentru observarea detaliilor subțiri).



Fig. 20. Structura desenată: 9 straturi (8 nivele), Thick Metal, Dielectric Brick

Urmează realizarea unei analize de convergență pentru a determina nivelul de detalii necesar de a fi introdus în analiză. Mărimea primară de interes pentru dispozitivul simulat este capacitatea primară. Pentru fiecare analiză electromagnetică se vor salva parametri S într-un fișier Touchstone care va fi folosit în Microwave Office pentru optimizarea schemei echivalente și obținerea parametrilor din schemă. Valorile calculate cu relațiile din curs pentru modelul echivalent (valorile de start din MWO) sunt cele din figura 11:

$$C_PRIME = 0.8459 \, pF, L_M 2 = 0.0186 nH, L_M 3 = 0.0375 nH$$

RES = 1.5418 Ω , $C_M 2 = 0.0673 \, pF, C_M 3 = 0.0101 \, pF$

E momentul să menționăm că ținta analizelor nu va fi să obținem exact aceste valori prin simulare, deoarece caracteristicile tehnologiei Plessey ar putea să fie puțin diferite de caracteristicile menționate în tabelul 3.

Investigarea efectului modelării metalizărilor se face pentru o structură cu celula de 4µm, cu modelul Thick metal cu un număr variabil de folii metalice (NS = 2,4,8,16), pe o structură fără utilizarea blocurilor dielectrice (Si₃N₄ aplicat pe metalizări) pentru accelerarea analizelor. Vom verifica și situația utilizării unor modele mai puțin performante pentru metalizări (NS = 0, metalizare ideală - LossLess - sau normală - Normal Metal). Pentru aceste modele, trebuie să ținem cont de dispariția înălțimii metalizărilor, care nu sunt neglijabile, acest lucru putând fi realizat prin eliminarea straturilor de dielectric de înălțime h_{PI 1} = h_{M2} - h_{Si} și h_{a 1} = h_{M3} - h_{Si} din figura 7b. Deoarece mărimea capacității unui condensator planar depinde explicit de distanța dintre armături, în acest mod asigurăm cu aproximație aceeași înălțime de poliimidă între acestea. Rezultatele analizei de convergență sunt prezentate în tabelul 4 și figura 21.

Nr	Cell [µm]	NS	NZ	Mem. [MB]	Timp/f [s]	C_PRIME [pF]	Obs.
1	4	0	0	8	1	0.829956	0 (LL)
2	4	0	0	8	1	0.830049	0 (NM)
3	4	2	0	49	6	0.865465	2 (TM)
4	4	4	0	94	13	0.865567	4 (TM)
5	4	8	0	226	42	0.86558	8 (TM)
6	4	16	0	662	170	0.865632	16 (TM)

Tabel 4. Analiză de convergență, caracteristici metalizări



Fig. 21. Analiză de convergență, caracteristici metalizări

Analiza de convergență arată importanța utilizării modelului "Thick Metal", dar demonstrează de asemenea faptul ca un număr de două nivele de metalizare ar fi suficiente pentru structura

analizată (cu mai multe nivele apare o variație a capacității dar nu este esențială). Vom alege totuși 4 nivele de metalizare pentru a îndeplini condițiile de obținere a punctelor bonus.

Investigarea dimensiunii celulei necesară pentru analiză va fi făcută de asemenea în lipsa blocurilor dielectrice aplicate pe metalizări pentru accelerarea analizelor. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 5 și figura 22. Se observă că variația capacității determinate este de ordinul 0.5% între celula de 8µm și cea de 0.5µm deci o dimensiune de 8µm ar putea fi suficientă. Totuși celulele fixate în planele de metalizare vor genera secționare corespunzătoare și a blocurilor de dielectric care vor fi aplicate pe metalizări. Avem anumite informații legate de necesitățile de memorie și timp de calcul și o indicație relativ la valoarea aproximativă a celulei care trebuie utilizată (~4µm) dar o decizie definitivă trebuie luată cu structura completă (inclusiv cu blocurile de dielectric)

Nr	Cell [µm]	NS	NZ	Mem. [MB]	Timp/f [s]	C_PRIME [pF]
1	8	4	0	46	6	0.86475
2	4	4	0	94	13	0.865567
3	2	4	0	196	42	0.867043
4	1	4	0	422	175	0.867043
5	0.5	4	0	910	795	0.869494

Tabel 5. Analiză de convergență, dimensiune celulă, fără "Dielectric Brick"



Fig. 22. Analiză de convergență, dimensiune celulă, fără "Dielectric Brick"

Investigarea efectului partiționării pe verticală a straturilor de dielectric care vor conține blocuri dintr-un alt dielectric (model "Dielectric Brick") se face cu o dimensiune a celulei mare (8µm), pentru a nu genera analize excesiv de lungi și consum excesiv de mare de memorie. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 6 și figura 23. Se observă importanța deosebită pe care o are introducerea blocurilor de dielectric (în principal stratul depus pe metalizarea M2 care joacă rol de dielectric dintre armăturile condensatorului), în schimb pentru această structură particulară partiționarea suplimentară pe verticală a blocului în 2 sau mai multe nivele nu aduce deloc

modificarea rezultatelor. Deci blocurile de dielectric vor trebui să apară dar nu este necesar să fie partiționate suplimentar, e suficient Z Parts = 1.

Nr	Cell [µm]	NS	NZ	Mem. [MB]	Timp/f [s]	C_PRIME [pF]	Obs.
1	8	4	0	46	6	0.86475	fără Dielectric Brick
2	8	4	1	150	13	0.907305	
3	8	4	2	272	22	0.907305	
4	8	4	4	629	60	0.907305	

Tabel 6. Analiză de convergență, partiționare pe verticală a "Dielectric Brick" (Z Parts)



Fig. 23. Analiză de convergență, partiționare pe verticală a "Dielectric Brick" (Z Parts)

În acest moment se cunoaște că e nevoie de metalizare "Thick Metal" cu 4 nivele de metalizare, blocuri de dielectric fără secționare suplimentară (Z Parts = 1) și o dimensiune a celulei de ordinul 8-4-2 μ m. O analiză de convergență pe structura completă (figura 20) este necesară pentru o decizie finală asupra dimensiunii celulei. Rezultatele unei astfel de analize sunt prezentate în tabelul 7 și figura 24. Se utilizează mărimile (Num. Sheets și Z Parts) determinate anterior și se variază dimensiunea celulei. Variația se oprește la celulă pătrată cu latura de 2 μ m, necesarul de memorie pentru a realiza analiza cu o celulă de 1 μ m fiind prea mare pentru a efectua calculele (61565MB). Variația capacității primare de la 8 la 2 μ m este foarte mică (0.24%) deci inclusiv analiza cu celulă de 8 μ m oferă valoarea acestei capacități cu precizia dorită.

Nr	Cell [µm]	NS	NZ	Mem. [MB]	Timp/f [s]	C_PRIME [pF]
1	8	4	1	150	13	0.907305
2	4	4	1	724	80	0.908093
3	2	4	1	5540	2012	0.909546

Tabel 7. Analiză de convergență, dimensiune celulă, cu "Dielectric Brick"



Fig. 24. Analiză de convergență, dimensiune celulă, cu "Dielectric Brick"

Putem păstra ca analiză finală pe cea corespunzătoare celulei de 2µm deoarece:

- a fost deja realizată
- chiar dacă precizia de determinare a capacității nu a fost prea mult îmbunătățită, un efect se poate observa la nivelul elementelor parazite din schemă.

Reprezentarea valorilor elementelor parazite pentru toate analizele menționate anterior sunt prezentate în tabelul 8 și figura 25.

Nr	Cell [µm]	NS	NZ	LM2	LM3	CM2	CM3	R
1	8	4	0	0.0409116	0.0371284	0.058781	0.002339	1.63628
2	4	4	0	0.0406743	0.036595	0.058749	0.002655	1.65111
3	2	4	0	0.0395224	0.037366	0.059294	0.002296	1.65123
4	1	4	0	0.0395224	0.037366	0.059294	0.002296	1.65123
5	4	0	0	0.0389316	0.0401411	0.05995	0.001309	1.69544
6	4	0	0	0.040071	0.0389618	0.059496	0.001479	1.5165
7	4	0	0	0.0394318	0.039994	0.059819	0.001427	1.79109
8	4	0	0	0.0401877	0.0392315	0.059493	0.001481	1.60394
9	4	2	0	0.0406282	0.036834	0.059127	0.002275	1.65311
10	4	8	0	0.0396937	0.0375932	0.059304	0.002124	1.6635
11	4	16	0	0.0400478	0.0372841	0.059154	0.00227	1.68848
12	8	4	1	0.0416706	0.0363008	0.058382	0.002731	1.5549
13	4	4	1	0.0412981	0.0359557	0.058656	0.002748	1.56621
14	2	4	1	0.0395643	0.0373039	0.059328	0.002272	1.56837
15	8	4	2	0.0416706	0.0363008	0.058382	0.002731	1.5549
16	8	4	4	0.0416706	0.0363008	0.058382	0.002731	1.5549
17	0.5	4	0	0.0401386	0.0366658	0.059027	0.002665	1.66789

Tabel 8. Analiză de convergență, valori elemente parazite



Fig. 25. Analiză de convergență, valori elemente parazite

Se observă că valorile elementelor parazite sunt consistente între analize pentru elementele reactive, cu excepția pierderilor în structură caracterizate de rezistența serie, a cărei valori depind destul de mult de modelarea pierderilor prin metalizări și de prezența pasivizărilor de Si₃N₄ aplicate pe metalizări (reprezentare pe axa secundară din dreapta în fig. 25). Mai ales valoarea rezistenței beneficiază de micșorarea celulei la $2\mu m$ (index 14 în tabelul 8), rezistența crescând cu 0.84% față de analiza cu $8\mu m$ celulă.

Schema echivalentă finală este cea din figura 26.



Fig. 26. Schemă echivalentă finală, condensator PI, latura X μm

Note finale

- Pentru interpretarea timpului necesar pentru analiză și scalarea acestui exemplu la sistemul de calcul propriu: analizele au fost realizate pe un sistem cu două microprocesoare fizice X5450 @ 3.00GHz, fiecare microprocesor având 4 nuclee fizice distincte. Fiecare din cele 8 nuclee a fost folosit în proporție de 100% pe parcursul analizelor. Memoria fizică prezentă: FB-DDR2, 32GB @ 333MHz, sistem de operare Windows 7, 64 biți.
- Optimizările în Microwave Office au fost realizate folosind metoda "Gradient Optimization", Maximum Iterations:50000, Convergence Tolerance:1e-7, Step Size:1e-5. Valorile obținute nu sunt mai precise (în limita atinsă la analize: 1%) și nu justifică

obligatoriu alegerea acestei metode pentru optimizare. A fost aleasă deoarece spre deosebire de utilizarea analizei "Random (Local)" rezultatele sunt repetabile (fără implicarea numerelor aleatorii). În general se poate utiliza fără probleme "Random (Local)".

- Majoritatea timpului total de analiză a fost folosit pentru cele două analize cu necesar de memorie ridicat, ca urmare recomandarea de a realiza majoritatea analizelor de convergență pe modele simplificate la maxim oferă un câștig de timp destul de ridicat. În exemplul prezentat se observă că la investigarea unui parametru (C, NS, NZ) ceilalți doi sunt reduși la minimul posibil.
- Respectarea inițială a indicațiilor cu privire la alegerea dimensiunilor celulei în funcție de dimensiunile fizice din circuit și relativ, pe cât posibil, la puterile lui 2, reduce extrem de mult timpul consumat cu desenarea schemei pentru multiplele structuri din analiza de convergență.
- Simulatorul din Sonnet are prevăzută funcționalitatea de rulare automată, succesivă a mai multor proiecte (fig. 27 - butonul Batch List). Se pot salva mai multe proiecte fără a realiza şi simularea (diverse dimensiuni de celulă, număr de straturi, de nivele de metalizare etc.), iar cu "Add Project" se pot adăuga în listă, chiar şi în timp ce un alt proiect este analizat. Acest lucru oferă posibilitatea de a folosi timpul în care calculatorul simulează un proiect pentru a desena un altul şi a-l adăuga la listă ş.a.m.d. (! util mai ales dacă simulatorul nu reuşeşte să folosească 100% toate procesoare existente)
- Informațiile despre Memorie/Timp se pot obține din simulator > butonul "Timing Info" sau după simulare, din orice program din suita Sonnet din meniu: "Project > View Log > Timing Info"

🛅 📑 🖬 🕨 🔲 III 💯 🔯 🥘 😡						
	Project: cap_8u_cell.son			1		
				Status Only <<		
	Project	Status				
Response Data	Project: cap_1u_cell.son 1.0 to 20.0 step of 1.0 GHz	Not Run	_	Add Project(s)		
FrorsWarnings	Project: cap_2u_cell.son 1.0 to 20.0 step of 1.0 GHz	Not Run		Remove Project		
	Project: cap_4u_cell.son	Not Run		Move to Next		
Timing Info				Move Up		
J	Project: cap_8u_cell.son 1.0 to 20.0 step of 1.0 GHz	Not Run		Move Down		
Batch List						
				Move to Last		

Fig. 27. Simulator Sonnet em, listă de proiecte (Batch List)