Simulazione Elettromagnetica

(per l'elettronica delle radiofrequenze)

D. Zito, Prof. B.Neri

Università di Pisa

Sommario

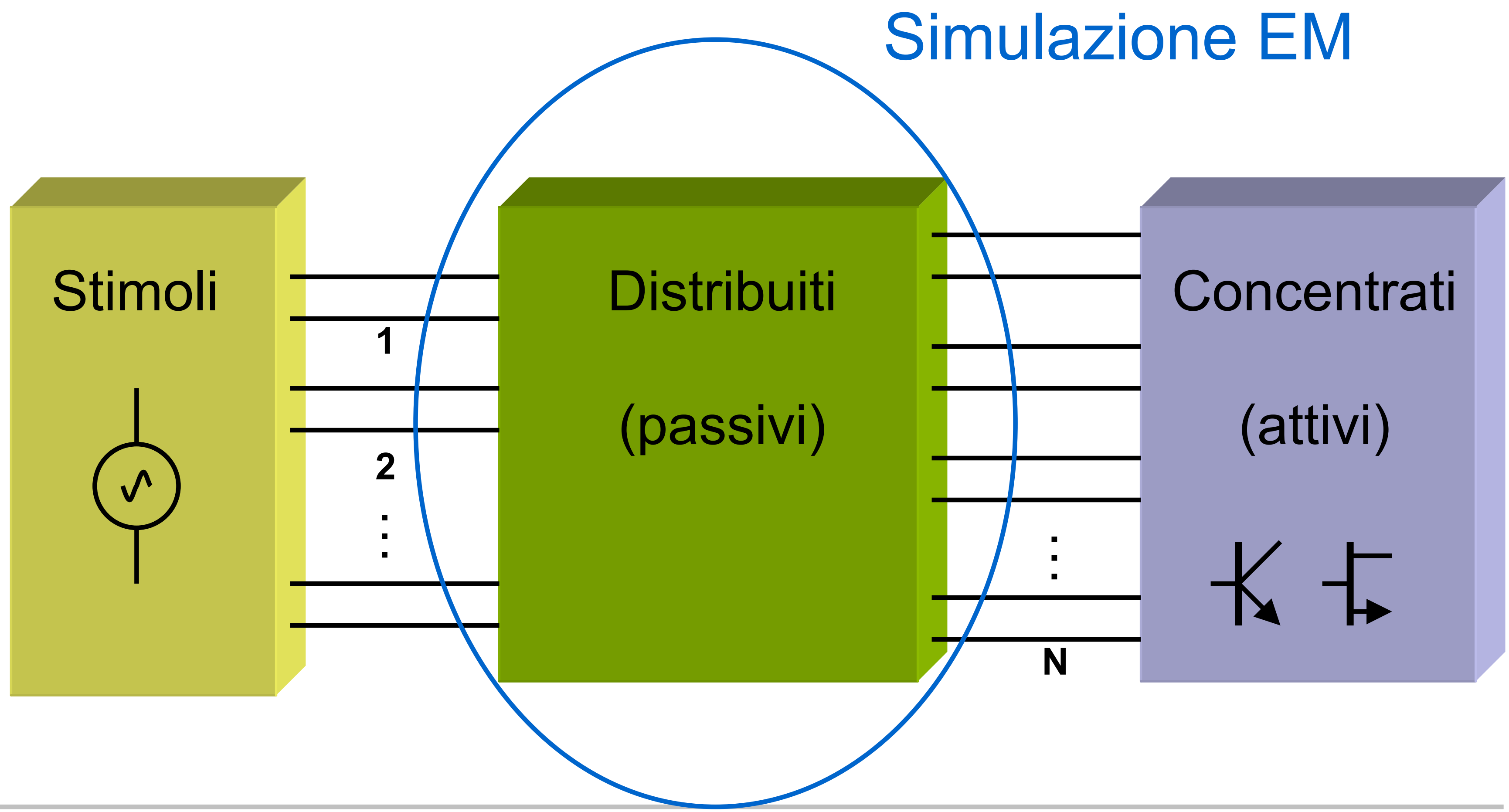
- Importanza della simulazione EM
- Introduzione ai simulatori EM
- Alcuni simulatori per applicazioni RF
- ASITIC: Semplice sessione

Importanza della simulazione EM

- Perchè?
  - circuiti a parametri distribuiti
  - mutua interazione tra dispositivi
- Obiettivi
  - struttura di base di un moderno simulatore EM
  - progettazione di circuiti integrati a microonde

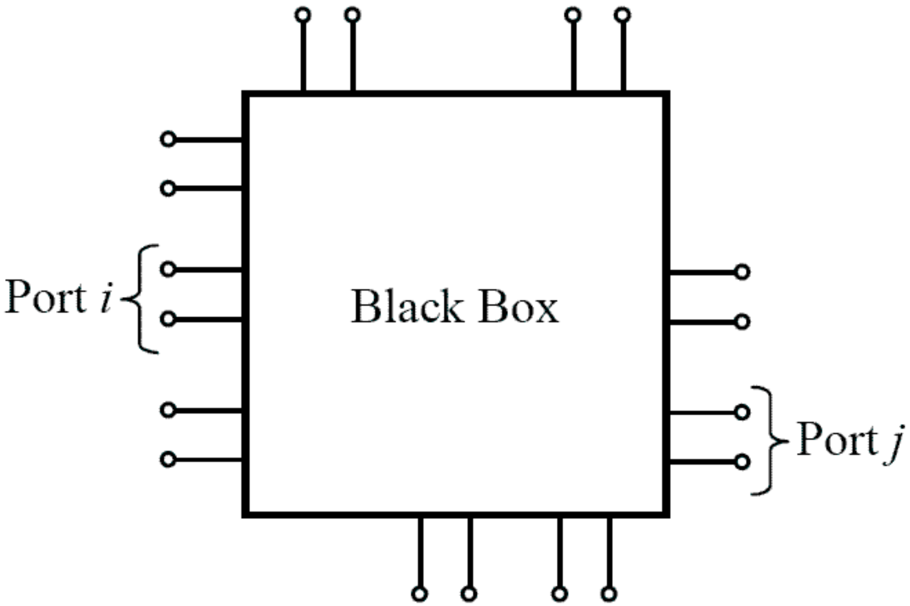
Importanza della simulazione EM

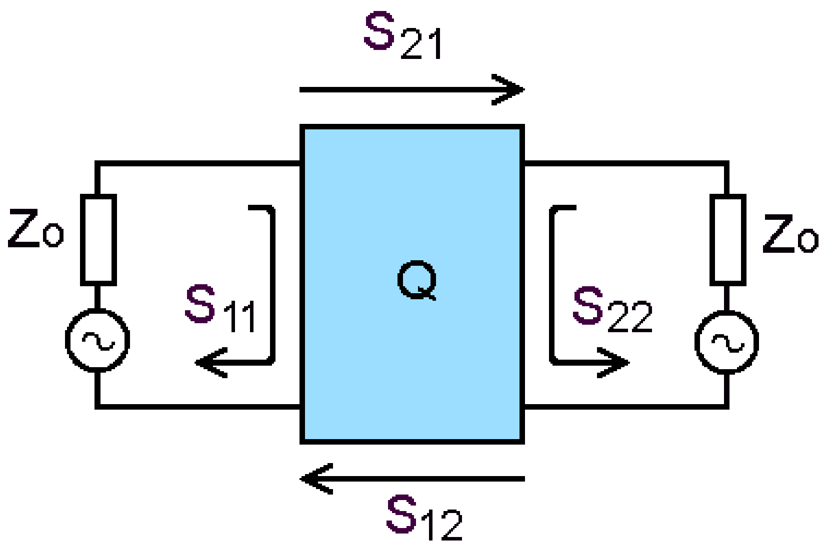
- Scenario



Importanza della simulazione EM

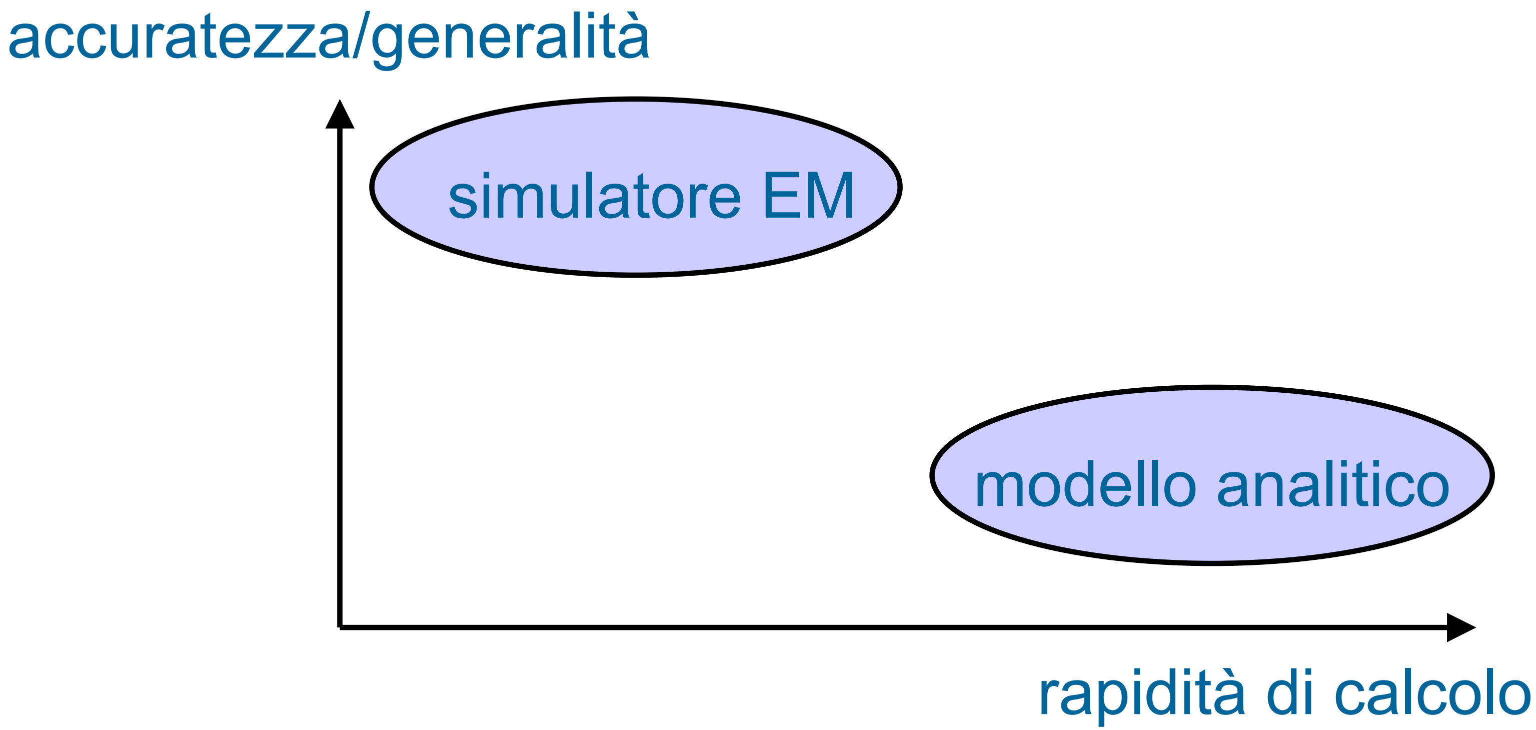
- Descrizioni nel dominio della frequenza: Z,Y, S





Importanza della simulazione EM

- Quale simulatore utilizzare ?



Agenda

- Importanza della simulazione EM
- Introduzione ai simulatori EM
- Alcuni simulatori per applicazioni RF
- ASITIC: Semplice sessione

- Equazioni di Maxwell

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathrm{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathrm{B}}}{\partial t} - \vec{M}$$

$$\oint_C \vec{\mathrm{E}} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t}\int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} - \int_S \vec{M} \cdot d\vec{s}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathrm{H}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$$

$$\oint_C \vec{\mathrm{H}} \cdot d\vec{l} = +\frac{\partial}{\partial t}\int_S \vec{D} \cdot d\vec{s} + \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V \rho dv = Q$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$$

Introduzione ai simulatori EM

- Equazioni di Maxwell per campi sinusoidali in regime stazionario (dominio fasoriale)

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathrm{E}} = -j\omega\vec{B} - \vec{M}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathrm{H}} = j\omega\vec{D} + \vec{J}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\mathrm{E}}\left(x, y, z, t\right) = A(x, y, z)\cos\left(\omega t + \phi\right)\hat{i}_x$$

$$\vec{\mathrm{E}}\left(x, y, z, t\right) = \Re e\left\{A(x, y, z)e^{j\phi}e^{j\omega t}\hat{i}_x\right\}$$

Introduzione ai simulatori EM

- Sorgenti

$$\vec{J}(x, y, z) = \vec{J}_S(x, y)\delta(z - z_o)$$

$$\vec{J}(x, y, z) = I_o(x)\hat{i}_x\delta(y - y_o)\delta(z - z_o)$$

$$\vec{J}(x, y, z) = I_o\hat{i}_x\delta(x - x_o)\delta(y - y_o)\delta(z - z_o)$$

Introduzione ai simulatori EM

- Campi in mezzi (dielettrici) lineari

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \left(1 + \chi_e\right) = \left(\varepsilon' - j\varepsilon''\right) \vec{E}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathrm{H}} = j\omega \vec{D} + \vec{J} = j\omega \left(\varepsilon' - j\varepsilon'' - j\frac{\sigma}{\omega} \right) = j\omega\varepsilon \vec{E}$$

$$\tan\delta = \frac{\omega\varepsilon'' + \sigma}{\omega\varepsilon'}$$

Introduzione ai simulatori EM

- Equazioni di Maxwell in mezzi lineari

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathrm{E}} = -j\omega\mu\vec{H} - \vec{M}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathrm{H}} = j\omega\varepsilon\vec{E} + \vec{J}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\mathrm{B}} = \mu\vec{H}$$

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$$

$$\mu, \varepsilon \in \mathbb{C}$$

$$\mu(f), \varepsilon(f), \sigma(f)$$

Introduzione ai simulatori EM

- Equazioni (omogenee) di Helmoltz

$$\nabla^2 \vec{\mathrm{E}} + \omega^2 \mu \varepsilon \vec{E} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{\mathrm{H}} + \omega^2 \mu \varepsilon \vec{H} = 0$$

$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon}, \quad k \in \mathbb{C}$$

- Onda piana (mezzo lineare senza perdite)

$$\mathrm{E}_x(z) = E^+ e^{-jkz} + E^- e^{jkz}; \quad k \in \mathbb{R}$$

$$\mathrm{E}_x(z,t) = E^+ \cos\left(\omega t - kz\right) + E^- \cos\left(\omega t + kz\right)$$

$$\mathrm{H}_y(z) = \frac{1}{\zeta}\left\{E^+ e^{-jkz} - E^- e^{jkz}\right\}$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \in \mathbb{R}; \quad \zeta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\Omega$$

Introduzione ai simulatori EM

- Onda piana (mezzo lineare con perdite)

$$\mathrm{E}_x(z) = E^+ e^{-j\gamma z} + E^- e^{j\gamma z}; \quad \gamma \in \mathbb{C}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

$$\mathrm{E}_x(z,t) = E^+ e^{-\alpha z} \cos\left(\omega t - \beta z\right) + E^- e^{+\alpha z} \cos\left(\omega t + \beta z\right)$$

$$\mathrm{H}_y(z) = \frac{1}{\zeta}\left\{E^+ e^{-j\gamma z} - E^- e^{j\gamma z}\right\}; \quad \zeta \in \mathbb{C}$$

- Onda piana in un buon conduttore (non perfetto)

$$\gamma = \alpha + j\beta \simeq (1 + j)\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$$

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$ (skin depth)

Introduzione ai simulatori EM

- Modi TEM (mezzi omogenei)

$$\vec{E}\left(x,y,z\right)=\left\{\vec{e}(x,y)+\hat{i}_z e_z(x,y)\right\}e^{-j\beta z}$$

$$\vec{H}\left(x,y,z\right)=\left\{\vec{h}(x,y)+\hat{i}_z h_z(x,y)\right\}e^{-j\beta z}$$

$$\overrightarrow{e_z}(x,y)=0 \qquad \nabla_t^2\vec{e}(x,y)=0 \qquad V_{12}=\int_1^2\vec{\mathrm{E}}\cdot d\vec{l}$$

$$\overrightarrow{h_z}(x,y)=0 \qquad \nabla_t^2\vec{h}(x,y)=0 \qquad I=\oint_C\vec{\mathrm{H}}\cdot d\vec{l}$$

Introduzione ai simulatori EM

• Campi e Potenziali Ausiliari (1/2)

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{M}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

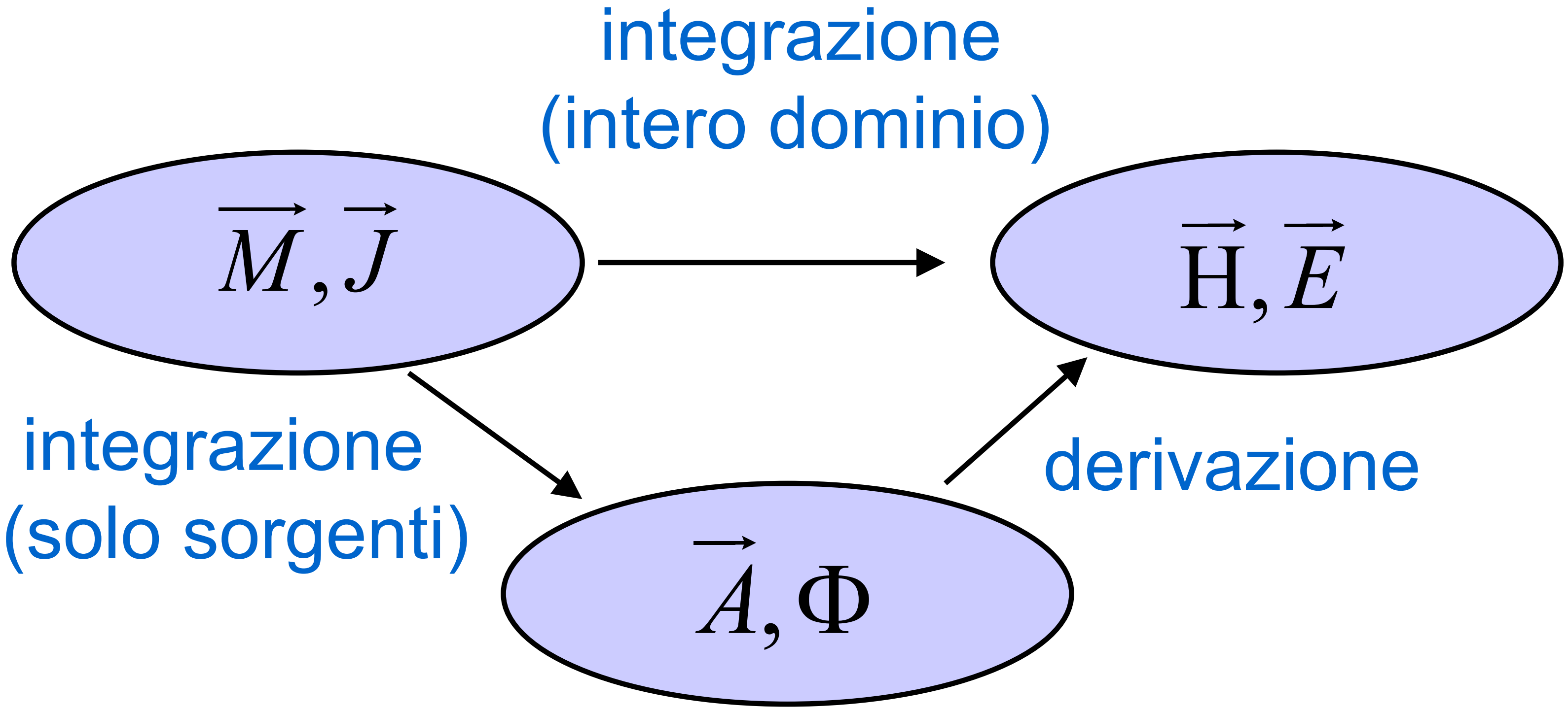
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

B è solenoidale sempre:

$$\boxed{\begin{aligned} \vec{B} &= \vec{\nabla} \times \vec{A} \\ \vec{E} &= -\vec{\nabla}\Phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \end{aligned}}$$

Introduzione ai simulatori EM

- Campi e Potenziali Ausiliari (2/2)

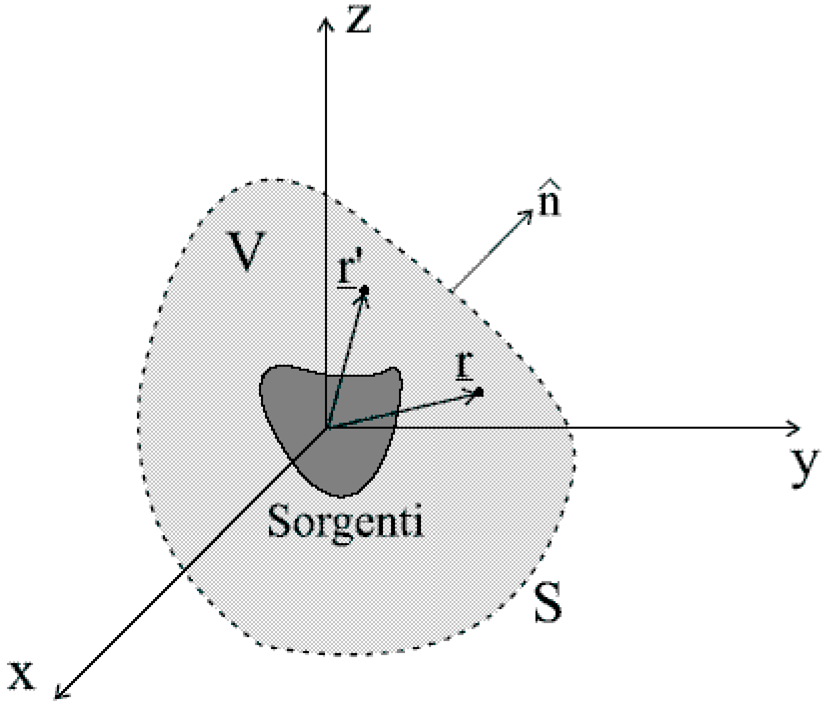


Introduzione ai simulatori EM

- Funzioni di Green e potenziali ausiliari
  - permettono di determinare i potenziali ausiliari (elettrico, magnetico)
  - dipendono della geometria e delle condizioni al contorno (problemi aperti)
  - sono generalmente pre-calcolate nei simulatori (vengono ricalcolate solo se si modifica la geometria)

Introduzione ai simulatori EM

- Funzioni di Green



$$\vec{A}(r) \propto \int_V \underline{\underline{G}}(r,r') \cdot \vec{J}(r')\,dV$$

$$\Phi(r) \propto \int_V \underline{\underline{G}}(r,r') \cdot \rho(r')\,dV$$

Introduzione ai simulatori EM

- Soluzione Numeriche delle equazioni di Maxwell e Simulatori EM
  - Discretizzazione del dominio in celle elementari in cui i campi, le correnti e le cariche possono considerarsi uniformi
  - Conversione di un sistema di equazioni differenziali ad un sistema di equazioni algebriche
  - Soluzione del sistema di equazioni algebriche

Introduzione ai simulatori EM

- Metodi Numerici per il calcolo dei campi EM

  — Discretizzazione dei campi E,H (metodi di dominio)

  Finite Difference (FDE), Finite Element (FEM)

  — Discretizzazione delle sorgenti (metodi al contorno)

  Metodo dei Momenti (MoM): superfici dei conduttori,

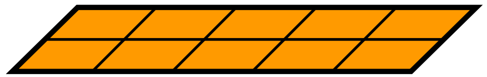
  Partial Element Equivalent Circuit (PEEC): superfici e volumi

  — Differenziali /Integrali

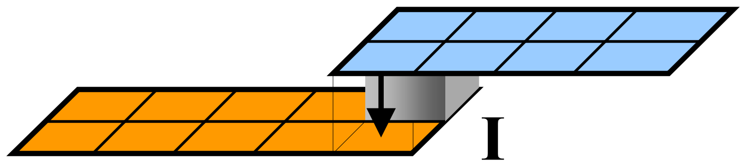
  — Tempo /Frequenza

Introduzione ai simulatori EM

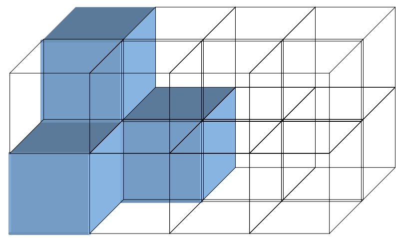
- Metodi Numerici e Dominio (meshing)
  - 2 D (planare)



  - 2 D e ½ (planare + vias)



  - 3 D (tridimensionale)



Introduzione ai simulatori EM

- Condizioni al contorno
  - PEC (conduttore elettrico perfetto)
  - PEM (conduttore magnetico perfetto)
  - Radiativa (campo nullo all'infinito)
  - miste

Introduzione ai simulatori EM

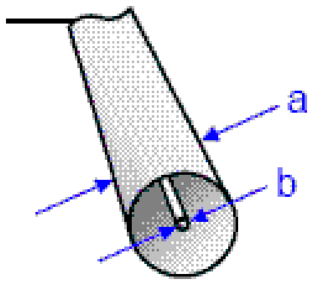
- Quale simulatore utilizzare ?
  - problema in esame (linearità, banda larga, etc)
  - mezzo (dispersivi, etc)
  - geometria (complessità)
  - accuratezza (3D > 2D)
  - tempo e risorse di simulazione (2D > 3D)

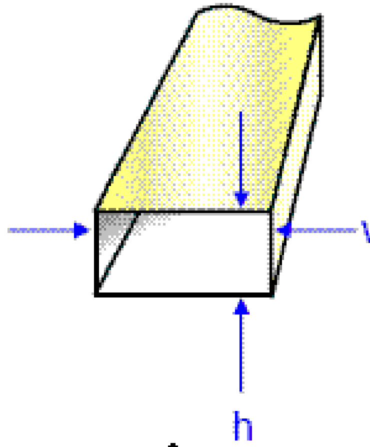
Introduzione ai simulatori EM

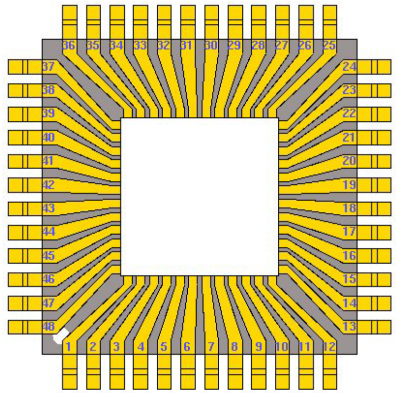
- Prima classificazione
  - bassa frequenza (motori elettrici, attuatori, etc.)
  - larga banda (schede per PC, etc.)
  - alta frequenza (antenne, radar, circuiti a microonde)

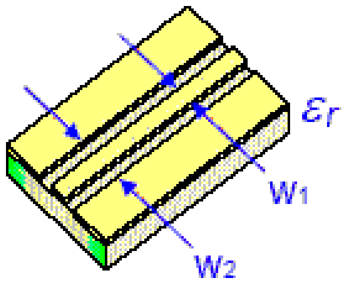
Introduzione ai simulatori EM

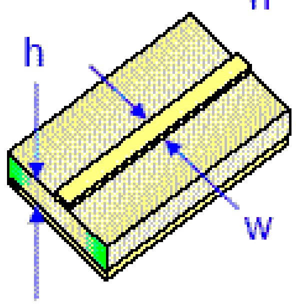
- Applicazioni a RF

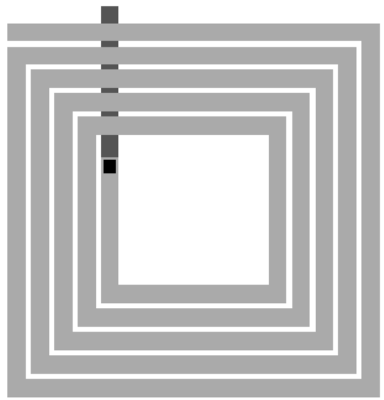












Introduzione ai simulatori EM

• Simulatori EM per applicazioni a RF

(dispositivi lineari, stato stazionario, effetti di ordine superiore)

— induttori, package, microstrisce, antenne, etc.

— dielettrici lineari (omogenei / non-omogenei)

— quasi –TEM (banda stretta, basse frequenze)

— full-wave (banda larga, discontinuità)

Introduzione ai simulatori EM

- Meccanismi di perdita

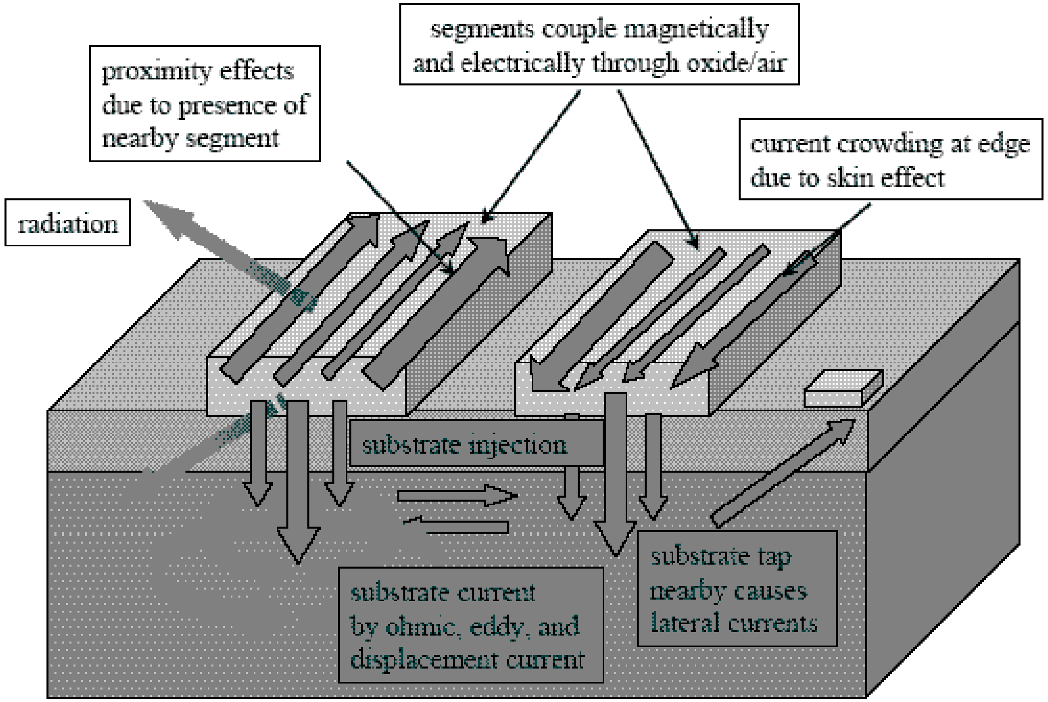
  — conducibilità finita delle metal (alluminio, polisilicio)

  — effetto pelle e proximity effect

  — perdite nel substrato (accoppiamenti capacitivi, correnti indotte, radiazione)

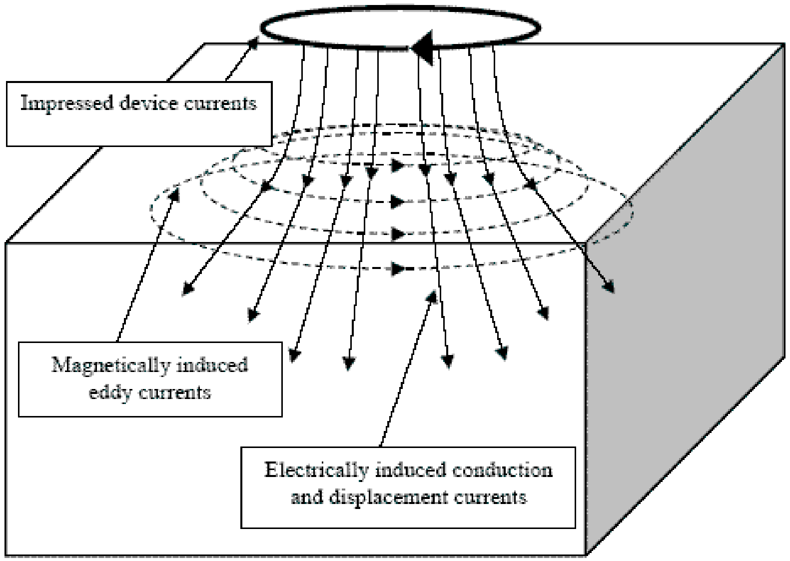
Introduzione ai simulatori EM

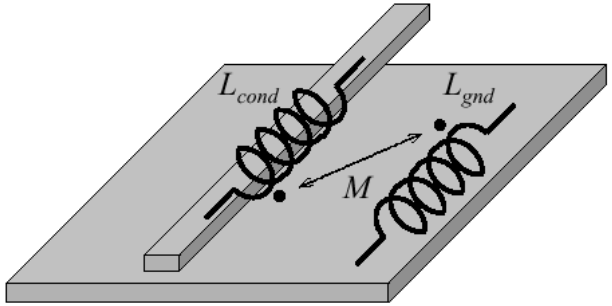
- Meccanismi di perdita

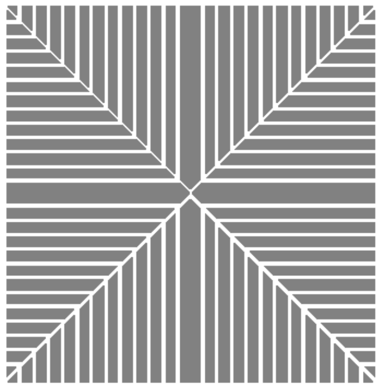


Introduzione ai simulatori EM

- Meccanismi di perdita nel substrato (eddy current)





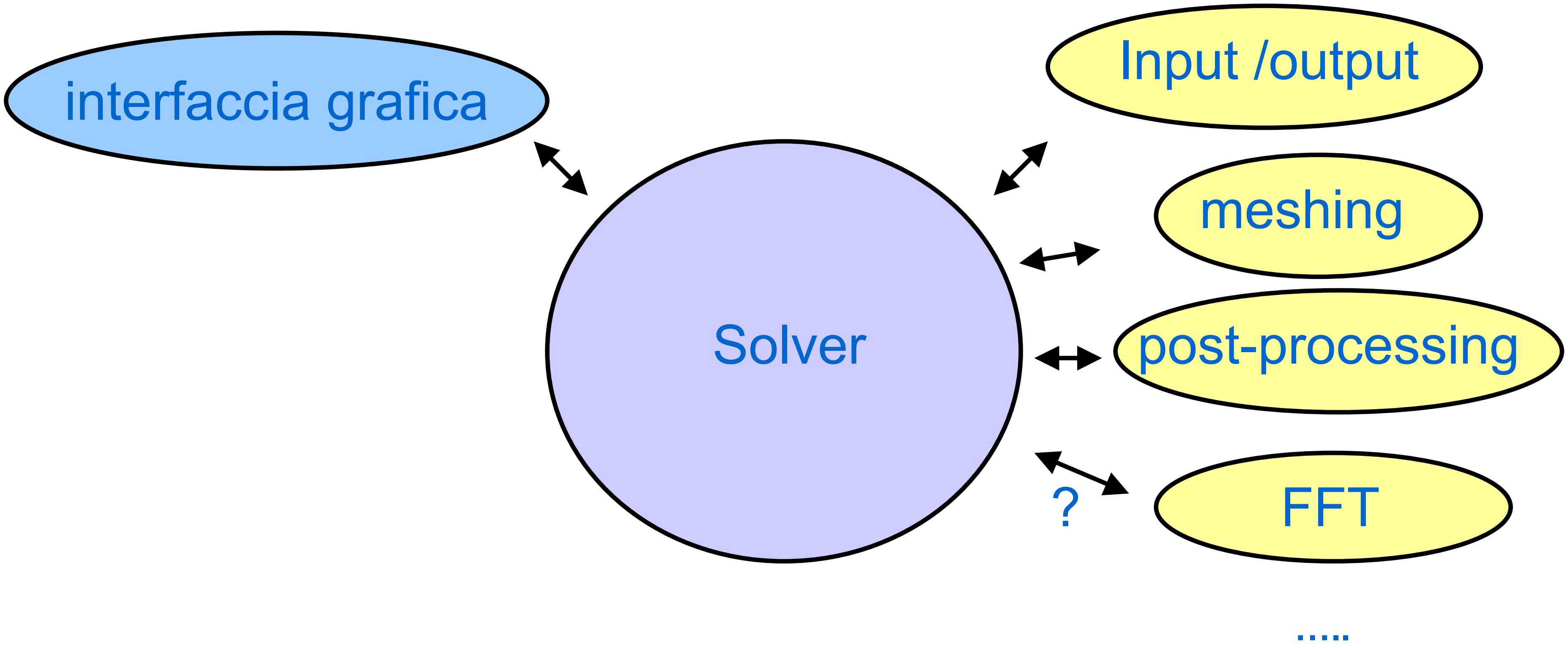


Agenda

- Importanza della simulazione EM
- Introduzione ai simulatori EM
- Alcuni simulatori per applicazioni RF
- ASITIC: Semplice sessione

Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

- Struttura generale di un simulatore EM



Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

- ASITIC (2D e ½, PEEC)
- Microwave Office EM Sight (2D e ½, MoM)
- Momentum (2D e ½, MoM)
- High Frequency Structures Simulator (3D, FEM)
- Finite Difference Time Domain (3D, FDE)

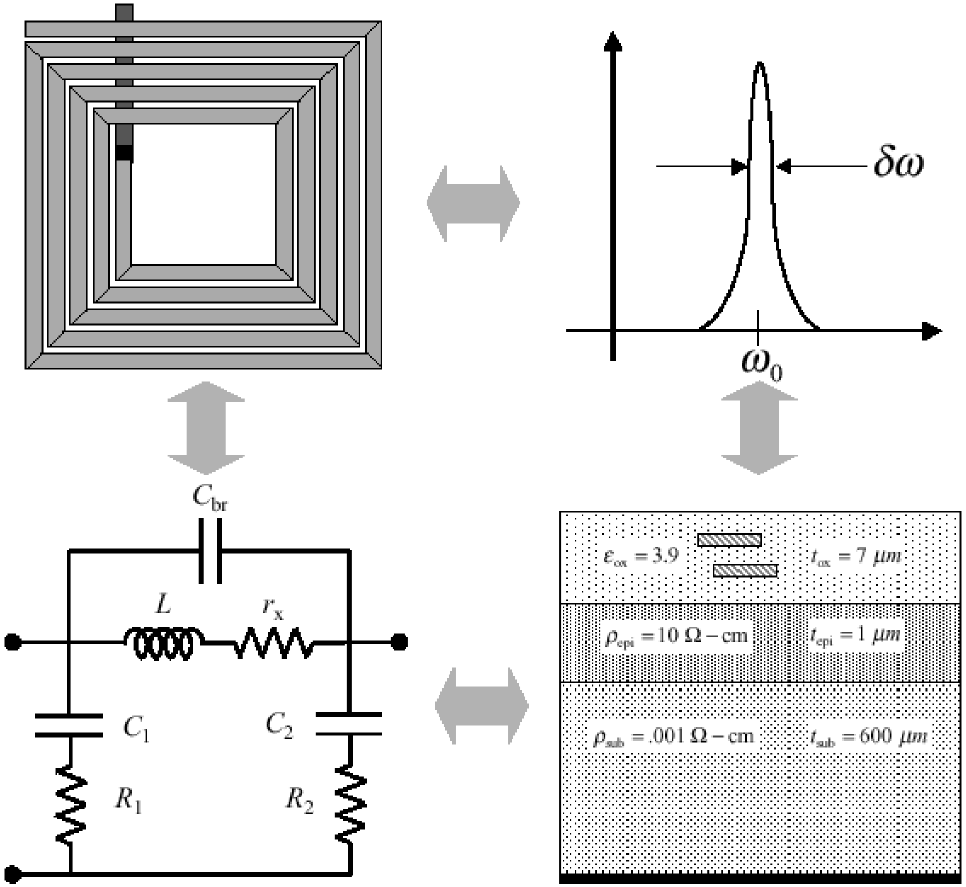
Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

- ASITIC (2D e ½, PEEC)
  - specifico per induttori e trasformatori per IC su Si
  - dielettrici a strati omogenei, non dispersivi (banda stretta)
  - no irradiazione, eddy current (opzionale), skin effect
  - dominio della frequenza
  - forma integrale
  - qualsiasi geometria (planare, multi-layer)

Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

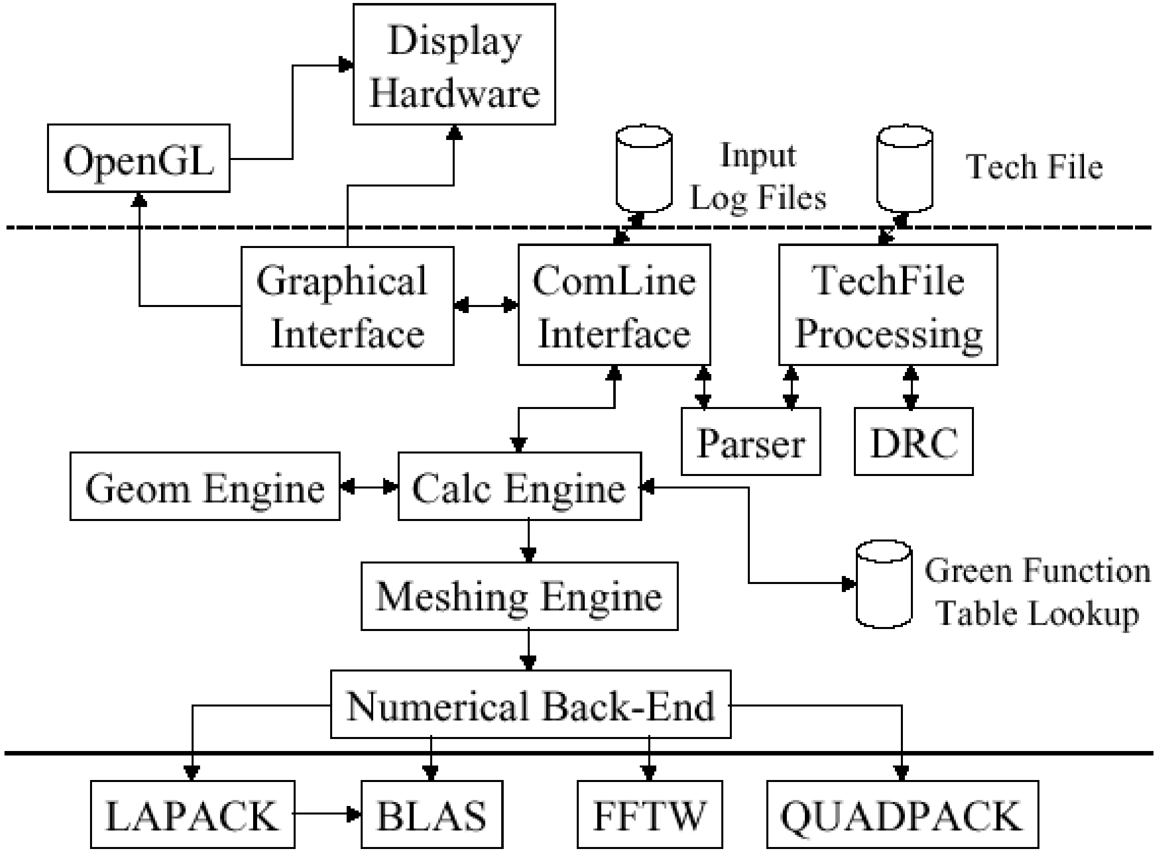
- ASITIC:

4 descrizioni



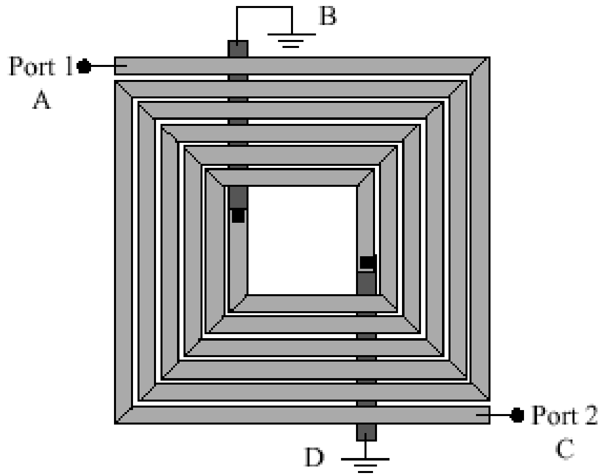
Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

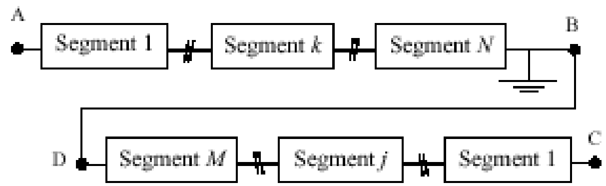
- ASITIC: organizzazione

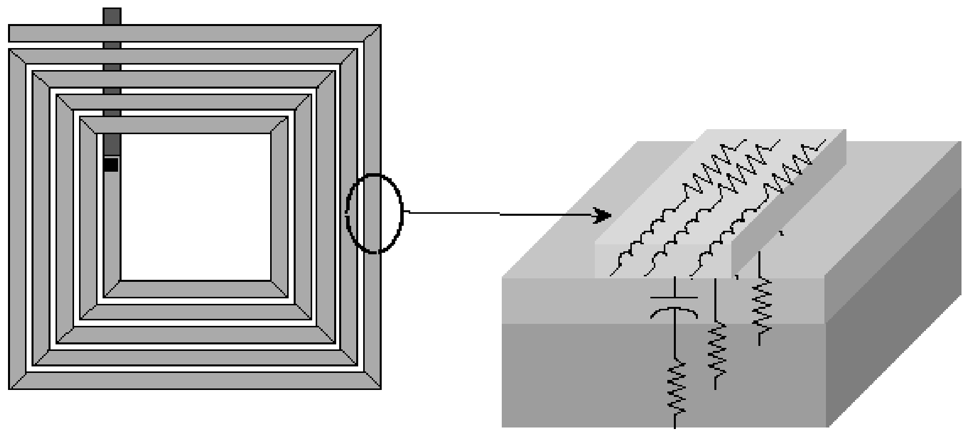


Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

- ASITIC: segmentazione

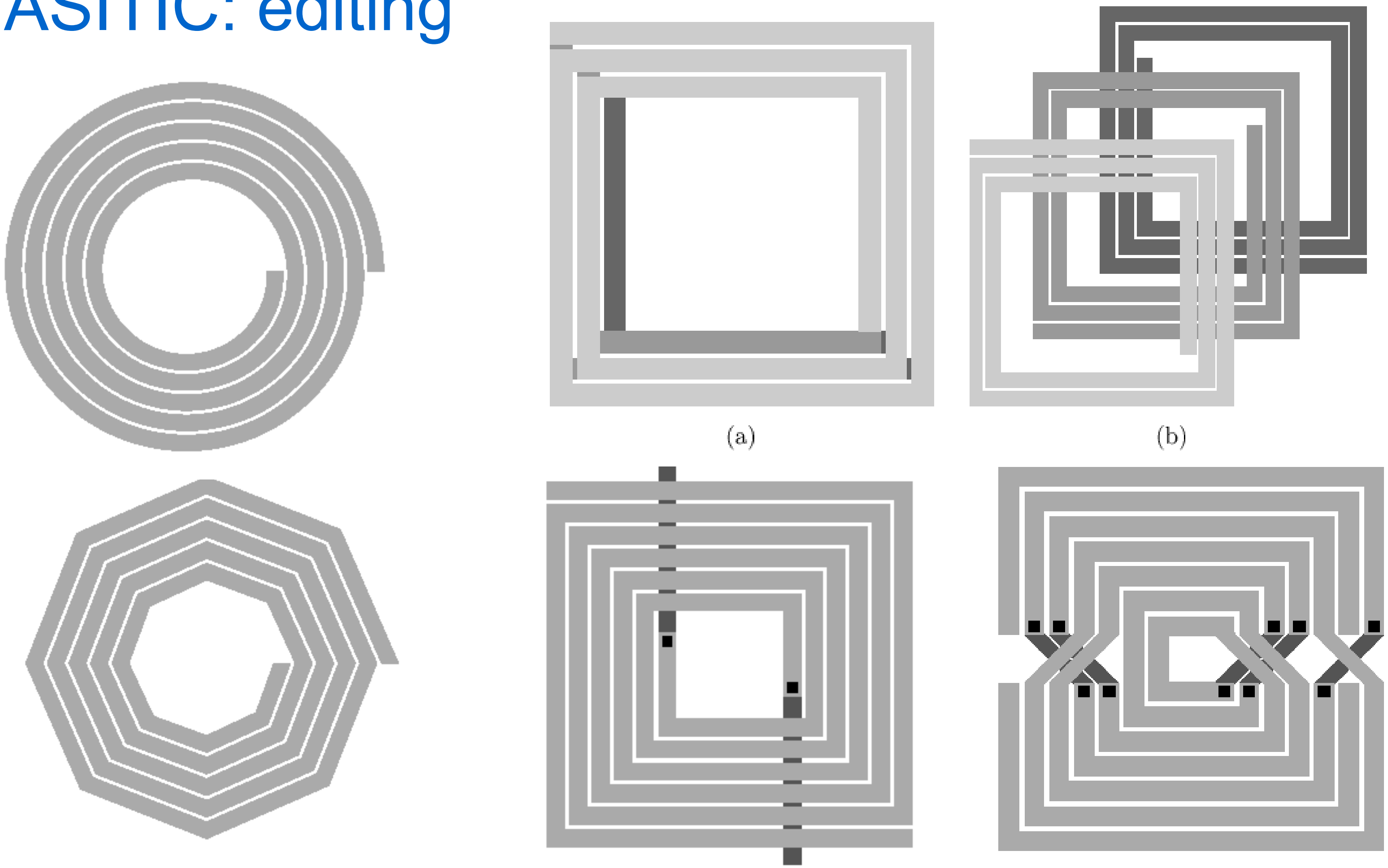






Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

- ASITIC: editing

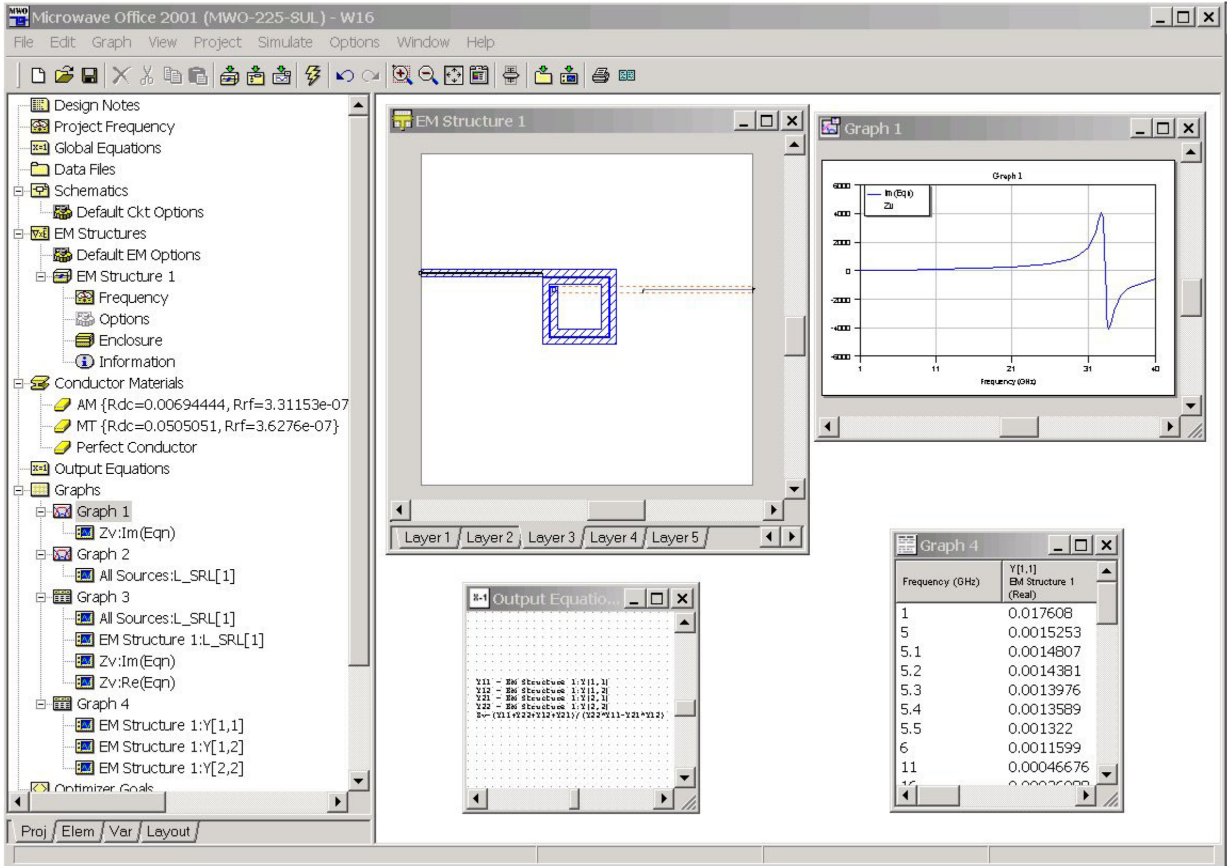


Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

- Microwave Office EM Sight (2D e ½, MoM)
  - full wave (planare, multi-layer)
  - dominio della frequenza (componenti passivi)
  - forma integrale
  - no geometrie circolari
  - dielettrici a strati omogenei

Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

- Microwave Office EM Sight: Interfaccia grafica

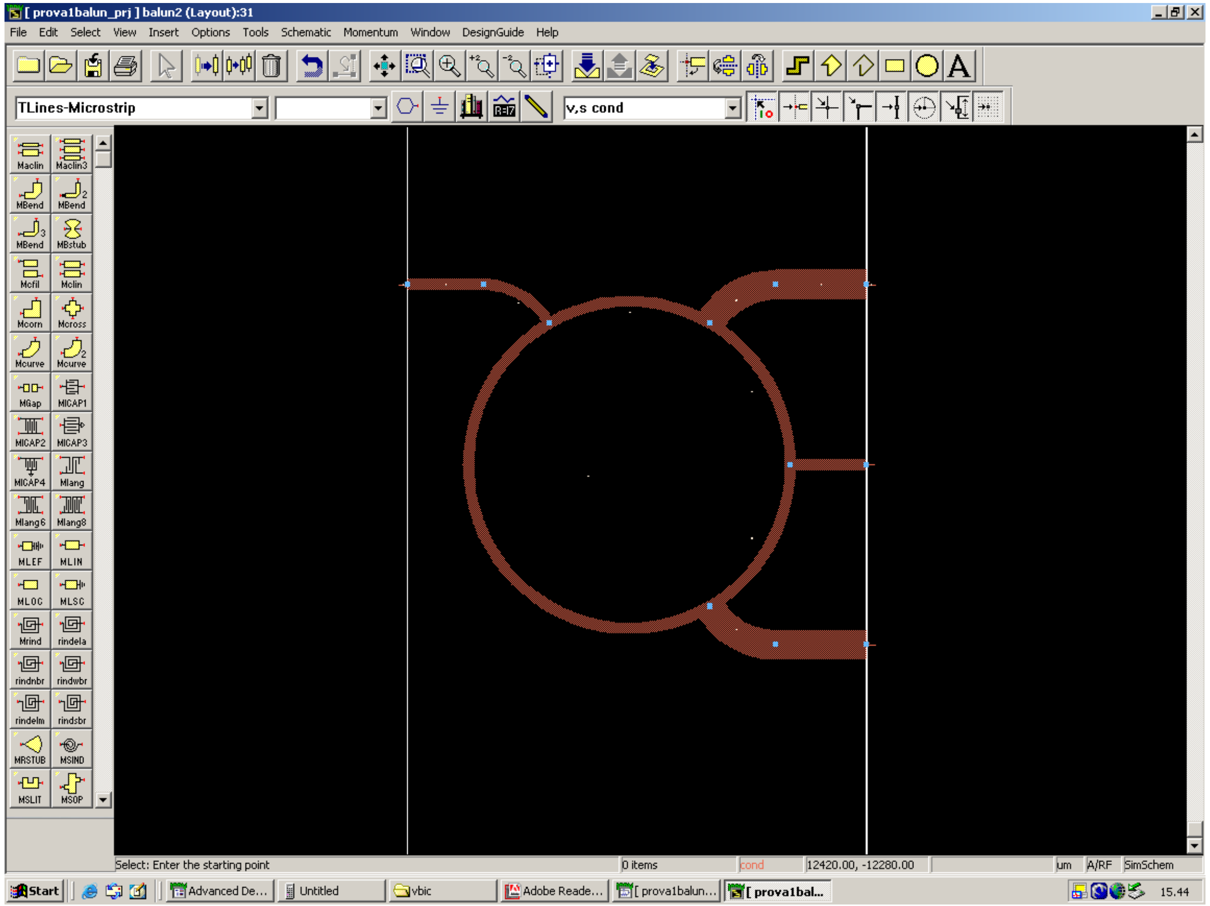


Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

- Momentum (2D e ½, MoM)
  - full wave (planare, multi-layer)
  - dominio della frequenza (componenti passivi)
  - forma integrale
  - sì geometrie circolari
  - dielettrici a strati omogenei

Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

- Momentum: Interfaccia grafica

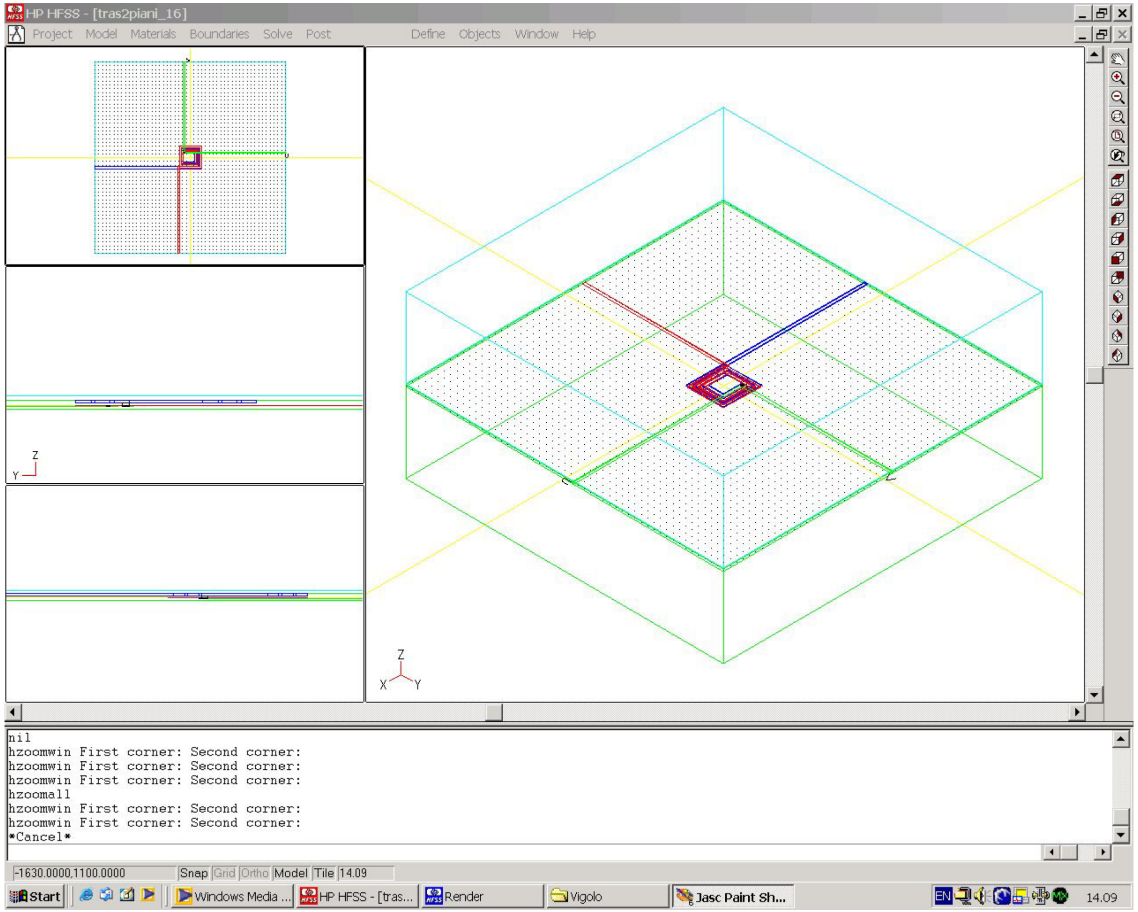


Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

- High Frequency Structures Simulator (3D, FEM)
  - full wave
  - dominio della frequenza (linerità)
  - forma differenziale
  - qualsiasi geometria
  - dielettrici non omogenei

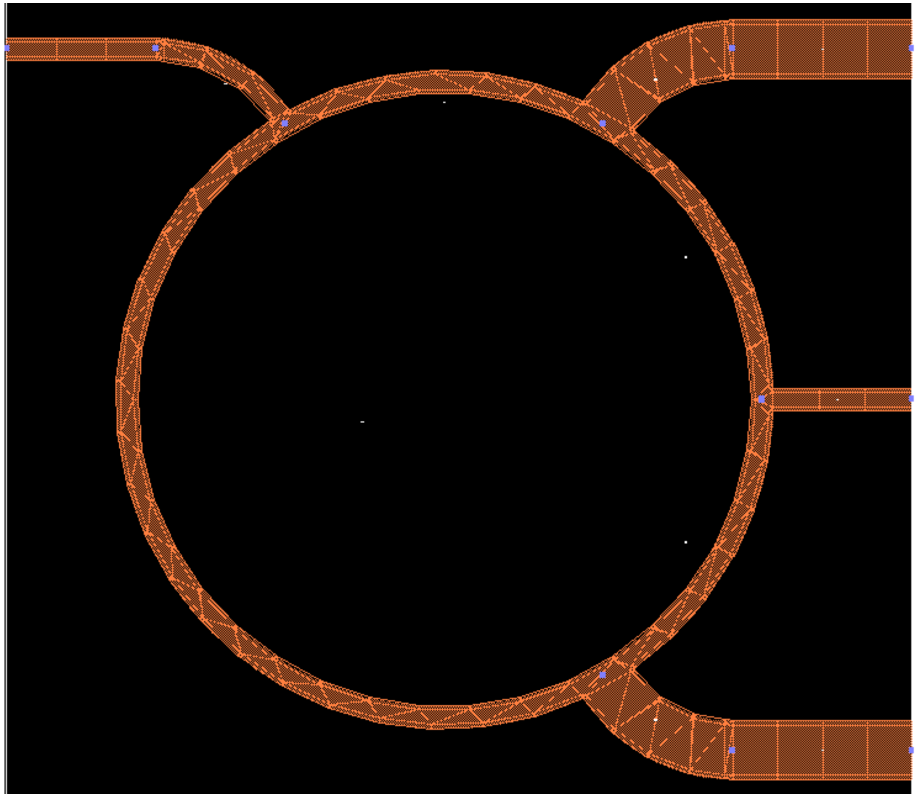
Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

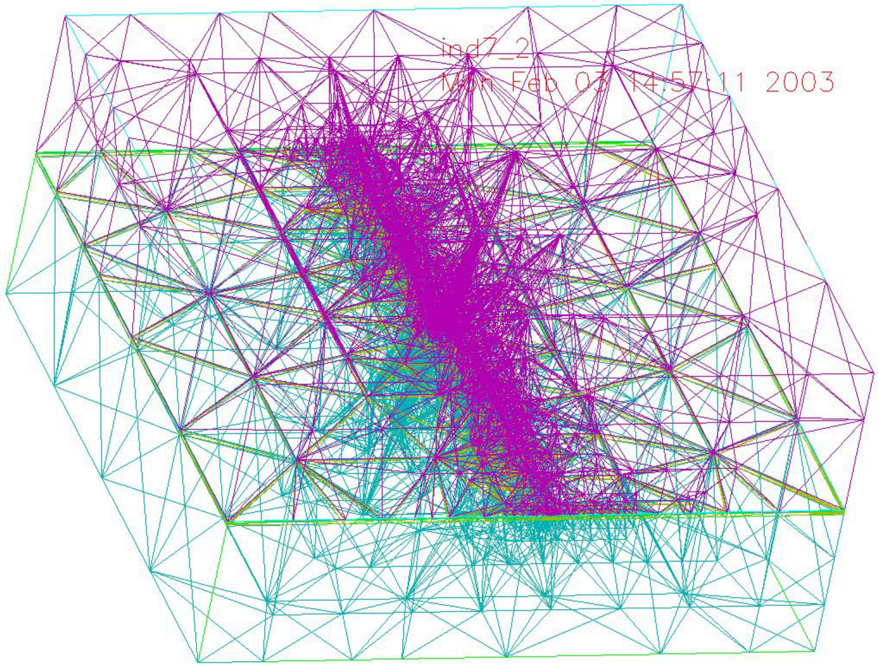
- High Frequency Structures Simulator: Interfaccia grafica



Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

- Meshing 2D (Momentum) e 3D (HFSS)





Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

- Finite Difference Time Domain (3D, FDE)
  - full wave
  - dominio del tempo (non-linearità)
  - forma differenziale (eq.alle differenze)
  - qualsiasi geometria
  - dielettrici non omogenei

Alcuni simulatori EM per applicazioni RF

- Finite Difference Time Domain:

  Interfaccia grafica (!!)

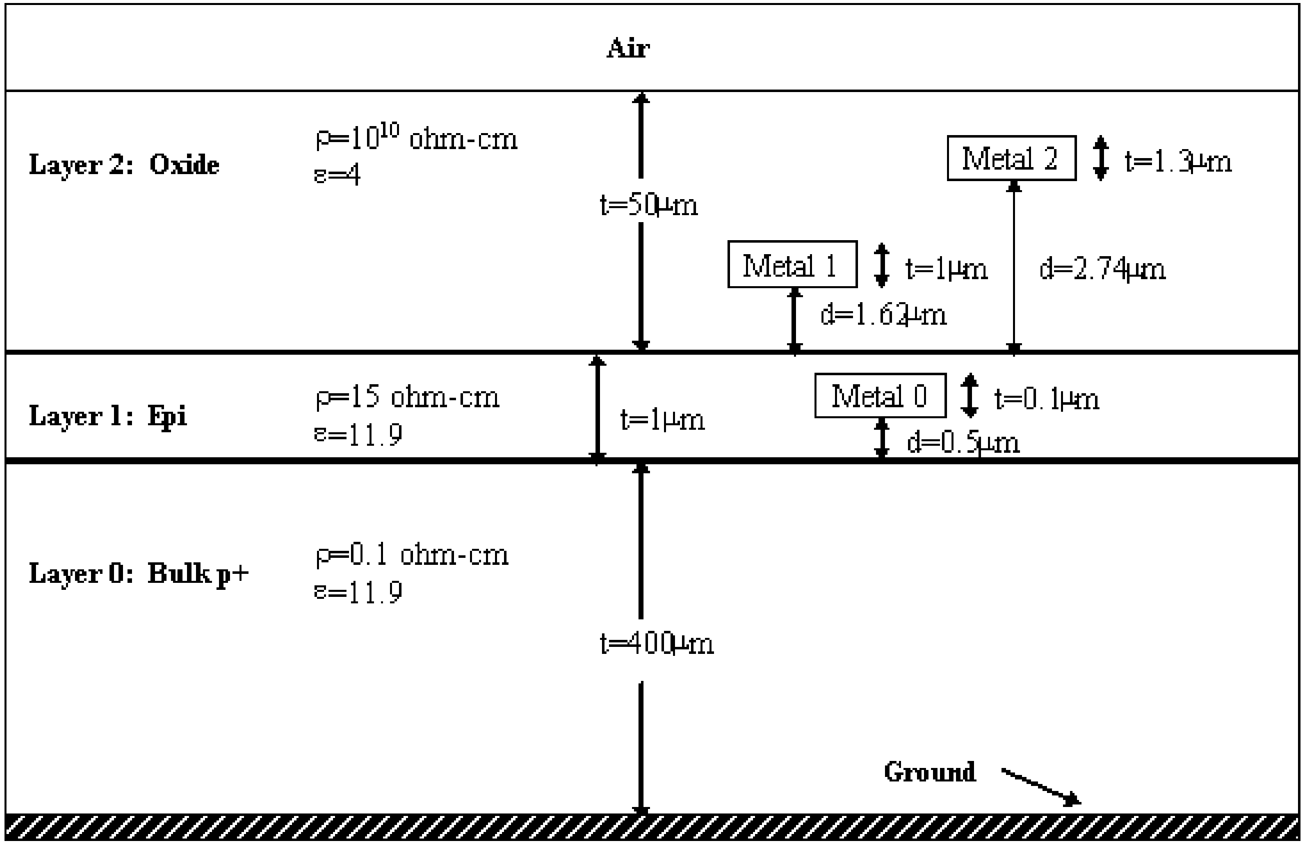
```
LI 30
1 60 1 60 1 360 2
1 60 1 60 361 362 2
1 60 1 60 363 363 2
1 60 1 60 364 364 5
1 60 1 60 365 369 5
1 60 1 60 370 373 7
1 60 1 60 374 400 8
19 20 17 42 367 367 6
21 42 41 42 367 367 6
41 42 19 40 367 367 6
23 40 19 20 367 367 6
23 24 21 38 367 367 6
25 38 37 38 367 367 6
37 38 23 36 367 367 6
27 36 23 24 367 367 6
27 28 25 34 367 367 6
29 34 33 34 367 367 6
33 34 27 32 367 367 6
31 32 27 28 367 367 6
31 32 27 28 368 369 6
19 20 15 18 370 371 6
19 42 19 20 370 371 6
41 42 21 42 370 371 6
19 40 41 42 370 371 6
19 20 23 40 370 371 6
21 38 23 24 370 371 6
37 38 25 38 370 371 6
23 36 37 38 370 371 6
23 24 27 36 370 371 6
25 32 27 28 370 371 6
```

Agenda

- Importanza della simulazione EM
- Introduzione ai simulatori EM
- Alcuni simulatori per applicazioni RF
- ASITIC: Semplice sessione

ASITIC: Semplice Sessione

- techfile (1/2)



ASITIC: Semplice Sessione

- techfile (2/2)

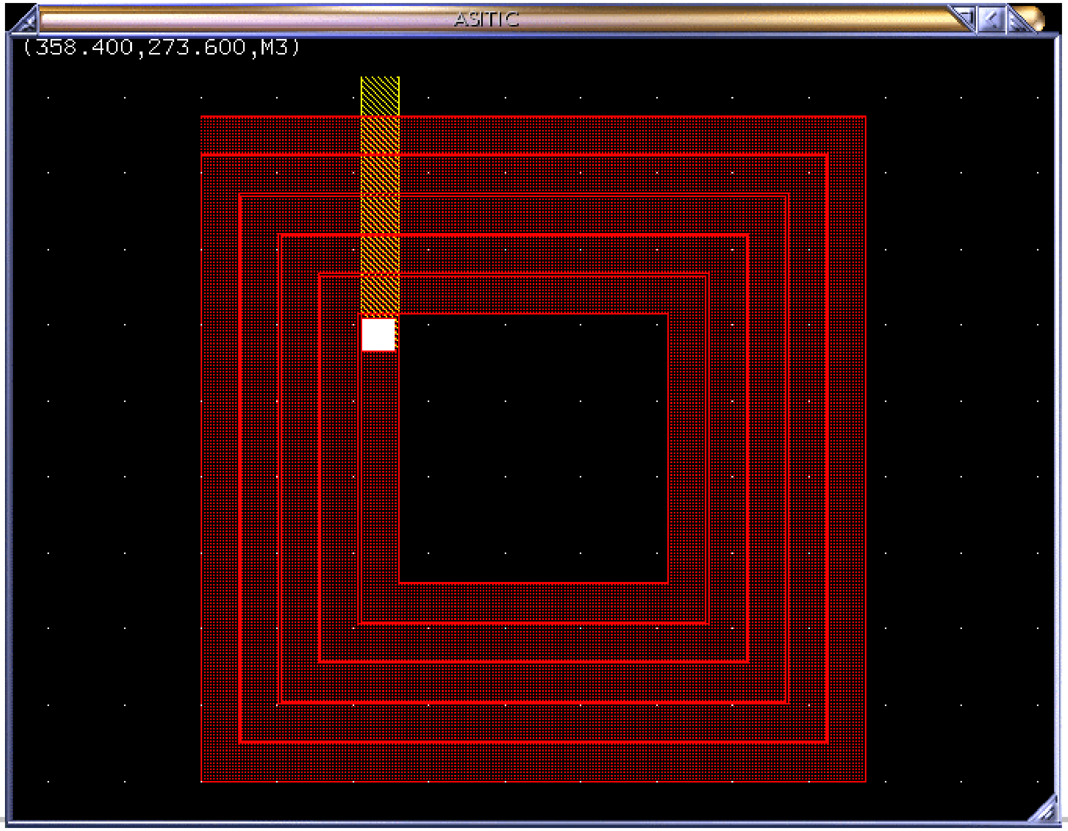
```
<chip>
        chipx = 512     ; dimensions of the chip in x direction in microns
        chipy = 512     ; dimensions of the chip in y direction
        fftx = 256      ; x-fft size (must be a power of 2)
        ffty = 256      ; y-fft size
        TechFile = sample.tek   ; the name of this file
        TechPath = /home/niknejad/tekf ; the pathname of the data files
        freq = .1

<layer> 0      ; Bulk Substrate

        rho = .1                ; Resistivity:  ohm-cm
        t   = 400               ; Thickness:  microns
        eps = 11.9              ; Permitivity:  relative

<layer> 1      ; Epi Layer

        rho = 15                ; ohm-cm
        t = 1                   ; microns
        eps = 11.9              ; relative

<layer> 2      ; Oxide Layer

        rho = 1e10              ; ohm-cm
        t = 50                  ; microns
        eps = 4                 ; relative

<via> 0        ; metal 1 to substrate

        top = 1                 ; via connects up to this metal layer
        bottom = 0              ; via connects down to this metal layer
        r = 5                   ; resistance per via
        width = .4              ; width of via
        space = 1.3             ; minimum spacing between vias
        overplot1 = .3          ; minimum dist to substrate metal
        overplot2 = .3          ; minimum dist to metal 1
        name = via0             ; name in ASITIC
        color = purple          ; color in ASITIC
```

ASITIC: Semplice Sessione

```
tcsh> asitic -t sample1.tek

ASITIC>  sq name=a:len=175:w=10:s=.5:n=5:xorg=200:yorg=200:metal=m3:exit=m2
```

- square spiral

(1/3)



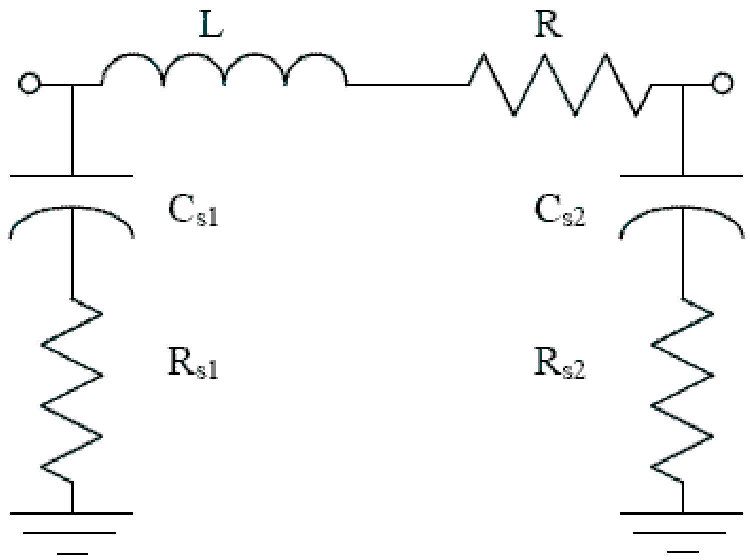
ASITIC: Semplice Sessione

- square spiral (2/3)

```
ASITIC>  ind a

Inductance of A = 4.13121 (nH)

ASITIC>  res a

Resistance of A = 4.246441 (Ohms)

ASITIC>  pix a 2

lambda = 37500.00, delta =  1.95

maxL = 1875.00, maxT =  1.56, maxW =  1.56
Performing Analysis at 2.00 GHz
Generating capacitance matrix (105x105)...
Generating inductance matrix (126x126)..
Inverting matrix......
Ind Timing:  tot =  1045, setup =    08, fill =   762
           invert =   266, reduce =    05, eddy =    00
Calc Times (ms):  total =  1378, cap =   309, ind =  1063, node =    05
Pi Model at f=2.00 GHz:  Q = 7.02, 7.16, 8.20
L  =  4.06 nH   R  =  5.29
Cs1=   104 fF   Rs1=   638
Cs2=    97 fF   Rs2=   710      f_res =  7.74GHz
```

ASITIC: Semplice Sessione

- circuito a pi-greco (pix)



ASITIC: Semplice Sessione

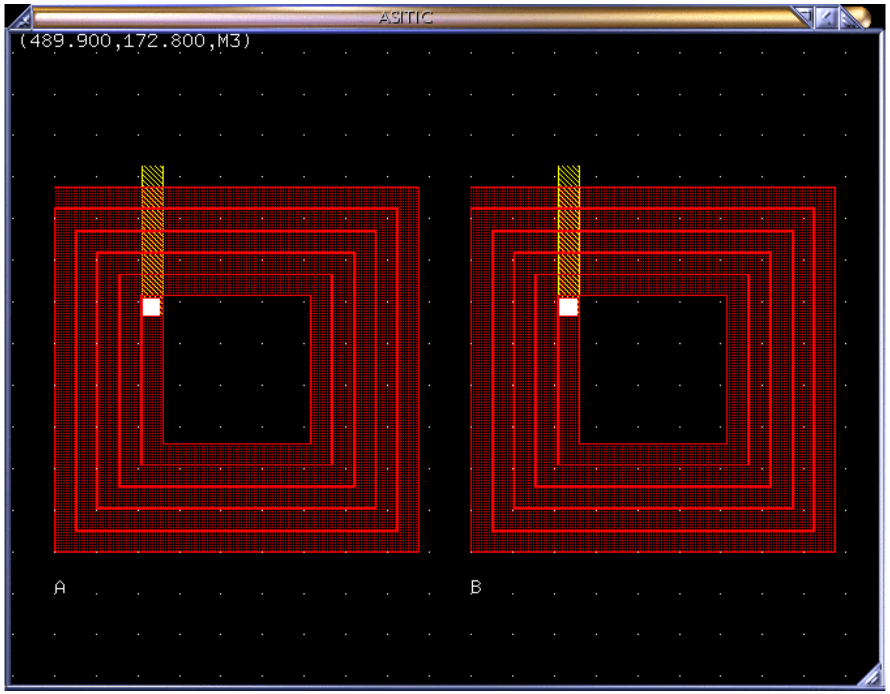
- square spiral (3/3)

```
ASITIC>  sq name=halo:len=200:wid=200:w=20:n=1:xorg=180:yorg=180:s=10:metal=msub
ASITIC>  mv halo 5 5
ASITIC>  pix a 2 halo

lambda = 37500.00, delta =  1.95

maxL = 1875.00, maxT =  1.56, maxW =  1.56
Performing Analysis at 2.00 GHz
Generating capacitance matrix (141x141)...
Generating inductance matrix (126x126)..
Inverting matrix......
Pi Model at f=2.00 GHz:  Q = 7.85, 7.81, 8.20
L  =  3.98 nH   R  =  5.83
Cs1=   117 fF   Rs1=  13.2
Cs2=   108 fF   Rs2=  29.5      f_res =  7.39GHz
```

ASITIC: Semplice Sessione

- coupling (1/4)

```
ASITIC>  del halo

ASITIC>  cp a b
ASITIC>  mv a -100 0
ASITIC>  mv b 100 0
ASITIC>  friend a b
ASITIC>  mv a -25 0
```



ASITIC: Semplice Sessione

- coupling (2/4)

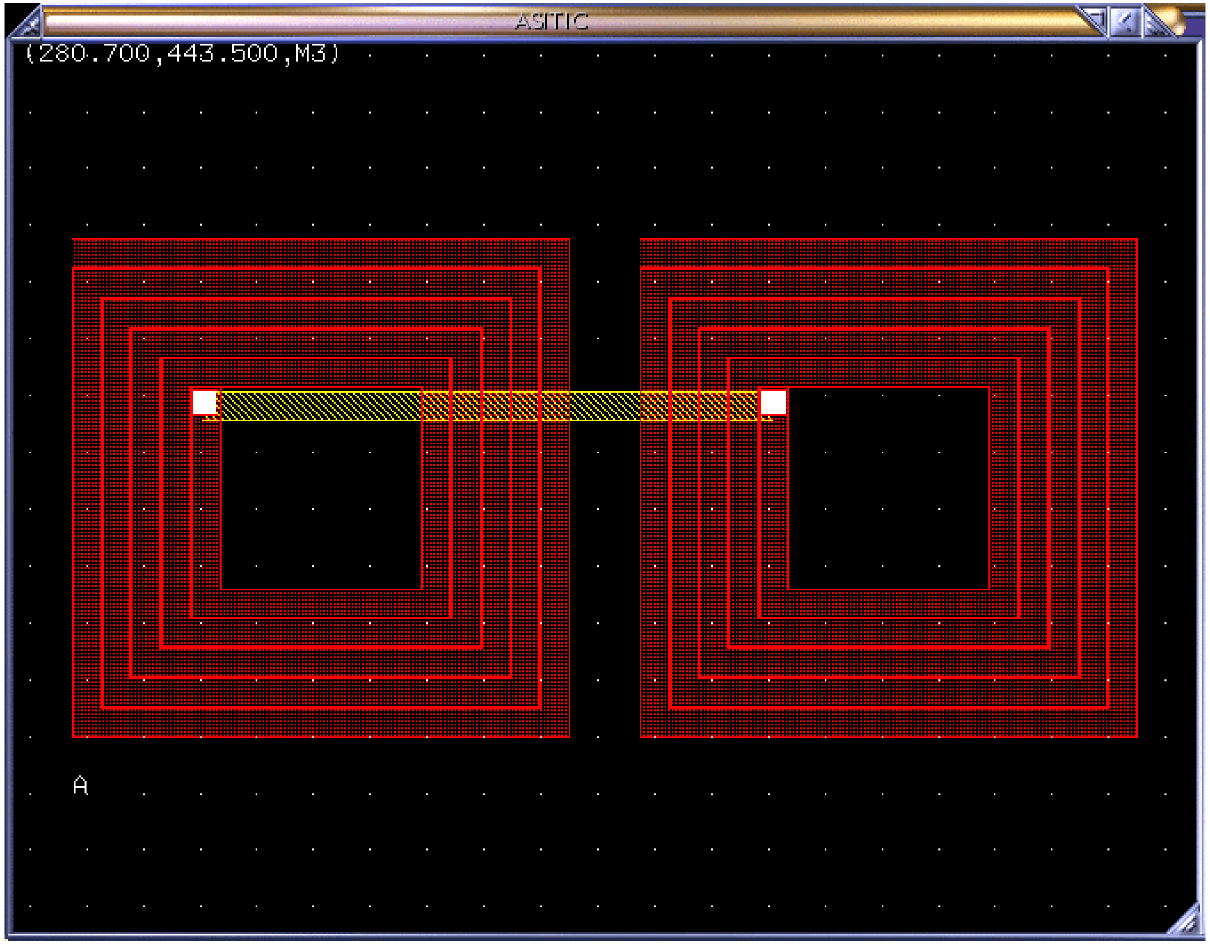
```
ASITIC>  k a b

Coupling coefficient of A and B: k =   -0.02748 and M =   -0.11355
(nH).

ASITIC>  k2 2 a b

lambda = 37500.00, delta =  1.95

maxL = 1875.00, maxT =  1.56, maxW =  1.56
Generating inductance matrix (252x252)..
Inverting matrix......
Ind Timing:  tot =  4673, setup =    20, fill =  2117
           invert =  2526, reduce =    33, eddy =    00
L(A,A)  =    4.03648 nH  R(A,A)  = 6.120
L(A,B)  =   -0.11181 nH  R(A,B)  = -0.074
L(B,B)  =    4.03624 nH  R(B,B)  = 6.127
```

ASITIC: Semplice Sessione

- coupling (3/4)

$$Z = j\omega(L_1 + L_2 + 2M)$$

```
ASITIC>  showdir

ASITIC>  flip b

ASITIC>  phase b  -1

ASITIC>  join a c b

ASITIC>  ind a

Inductance of A = 8.80189 (nH)
```



ASITIC: Semplice Sessione

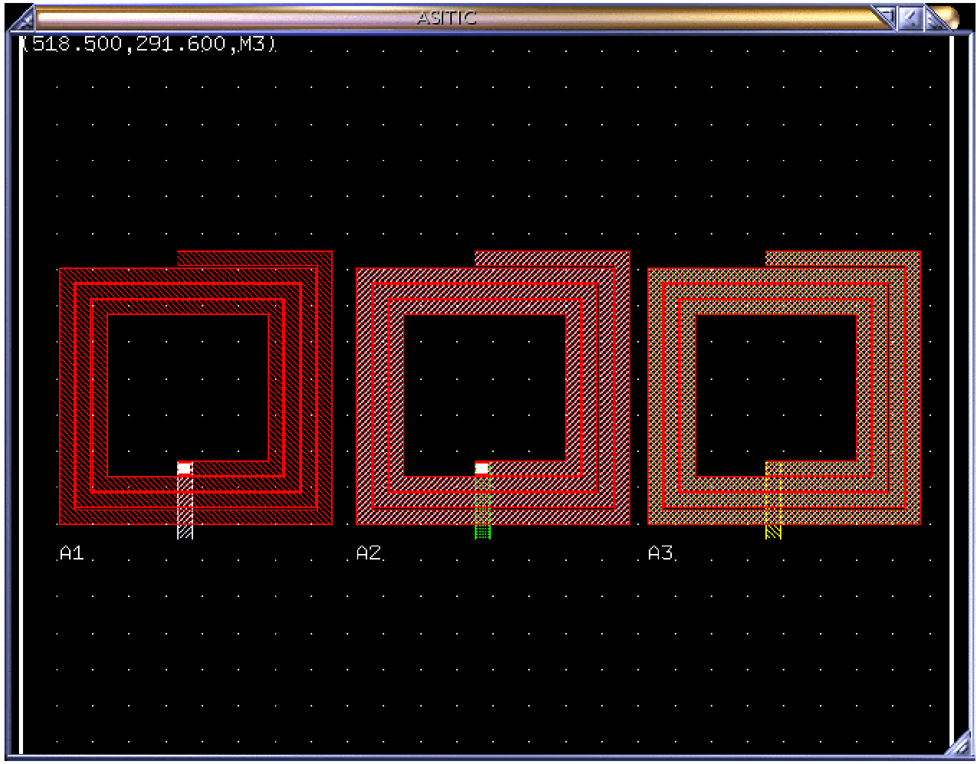
- coupling (4/4)

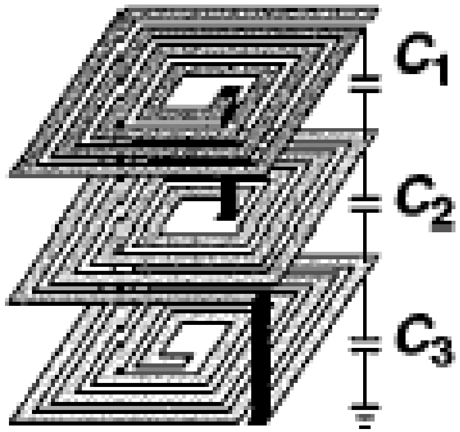
```
ASITIC>  pix a 2



lambda = 37500.00, delta =  1.95

maxL = 1875.00, maxT =  1.56, maxW =  1.56
Performing Analysis at 2.00 GHz
Generating capacitance matrix (205x205)...
Generating inductance matrix (246x246)..
Inverting matrix......
Ind Timing:  tot =  3964, setup =    02, fill =  1994
           invert =  1963, reduce =    04, eddy =    00
Calc Times (ms):  total =  6084, cap =  2099, ind =  3983, node =    02
Pi Model at f=2.00 GHz:  Q = 4.90, 4.77, 7.36
L  =  8.64 nH   R  =  7.67
Cs1=   187 fF   Rs1=   648
Cs2=   193 fF   Rs2=   624      f_res =  3.96GHz
```

ASITIC: Semplice Sessione

- Multi-Layer Spiral (1/3)

```
ASITIC>  sqsh name=a3:len=150:w=8:s=1:n=3.75:metal=m3:exit=m1:xorg=200:yorg=200:cbegin:cend:exit90
```





ASITIC: Semplice Sessione

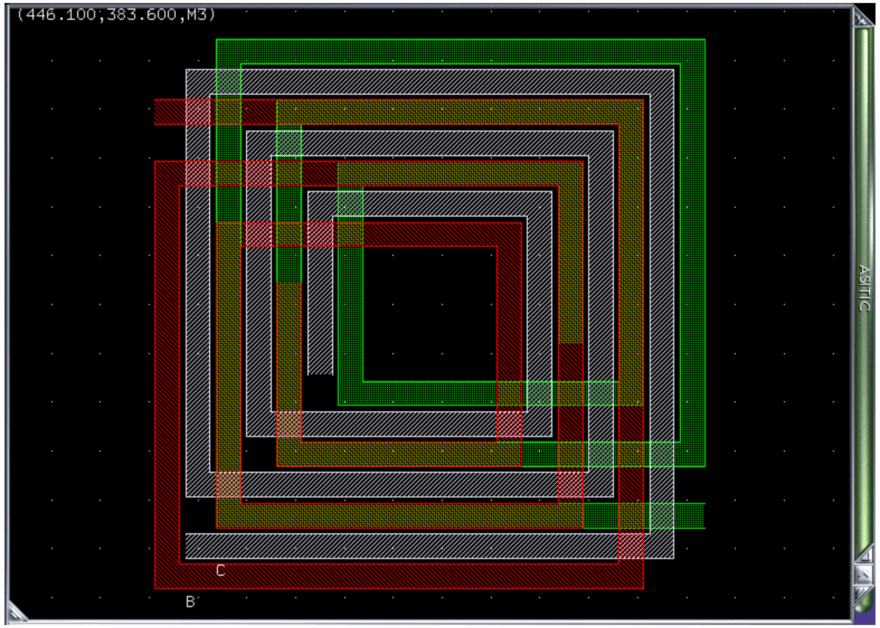
- Multi-Layer Spiral (2/3)

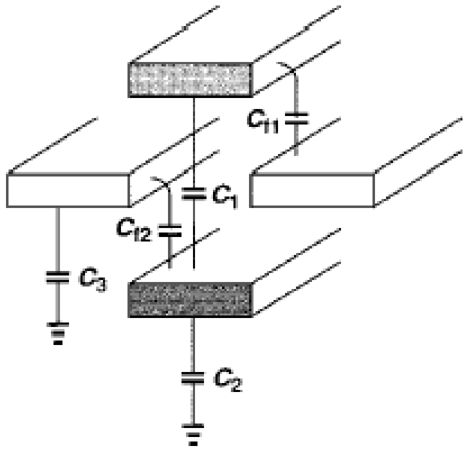
```
ASITIC>  pix a3 3

lambda = 25000.00, delta =  1.84
maxL = 1250.00, maxT =  1.47, maxW =  1.47
Performing Analysis at 3.00 GHz
Generating capacitance matrix (184x184)...
Generating inductance matrix (230x230)..
Inverting matrix......
Ind Timing:  tot =  3006, setup =    32, fill =  2444
           invert =   495, reduce =    32, eddy =    00
Calc Times (ms):  total =  5508, cap =  2502, ind =  3000, node =    05

Pi Model at f=3.00 GHz:  Q = 7.33, 7.34, 8.59
L   =  2.21 nH   R  =  4.04
Cs1=  89.2 fF   Rs1=   665
Cs2=  89.7 fF   Rs2=   683       f res = 11.34GHz
```

ASITIC: Semplice Sessione

- Multi-Layer Spiral (3/3)

```
ASITIC>  del a1 a2 a3
ASITIC>  sq name=s1:len=200:w=10:s=1:n=4:metal=m3:exit=m2:xorg=200:yorg=200:exit90
ASITIC>  sqmm name=s2:len=200:w=10:s=1:n=4:metal=m3:exit=m2:xorg=200:yorg=200:exit90
```

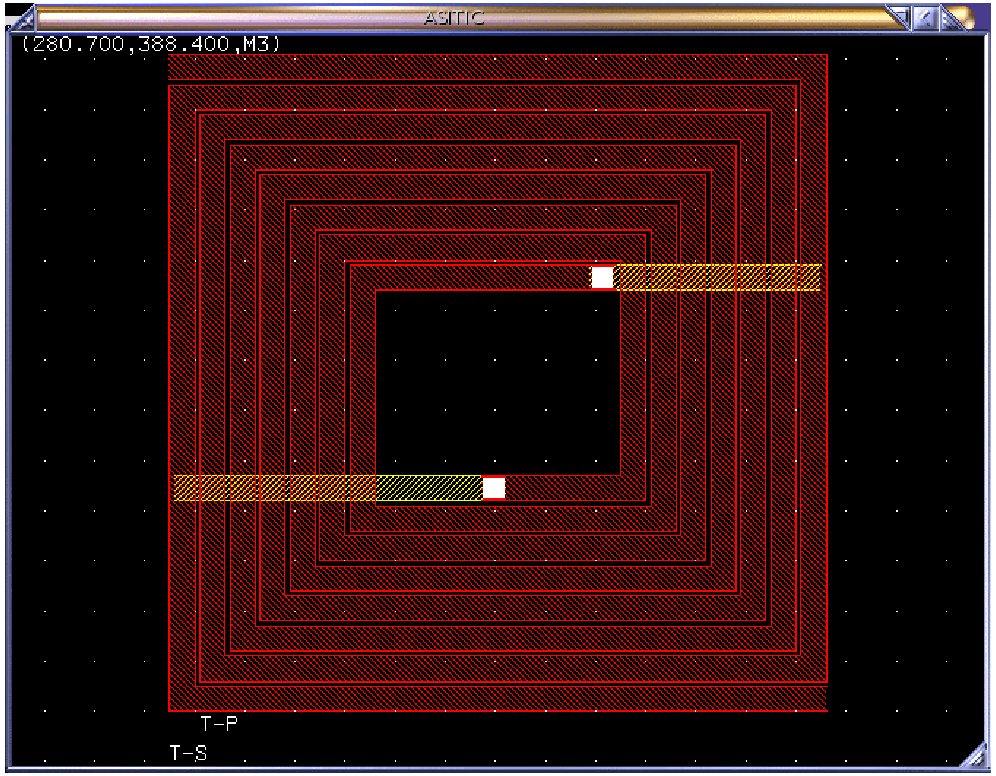




ASITIC: Semplice Sessione

- Square Planar Transformer (1/2)

```
ASITIC>  trans name=t:len=250:w=10:s=2:n=3.75
ASITIC>  mv t-p 120 120
```



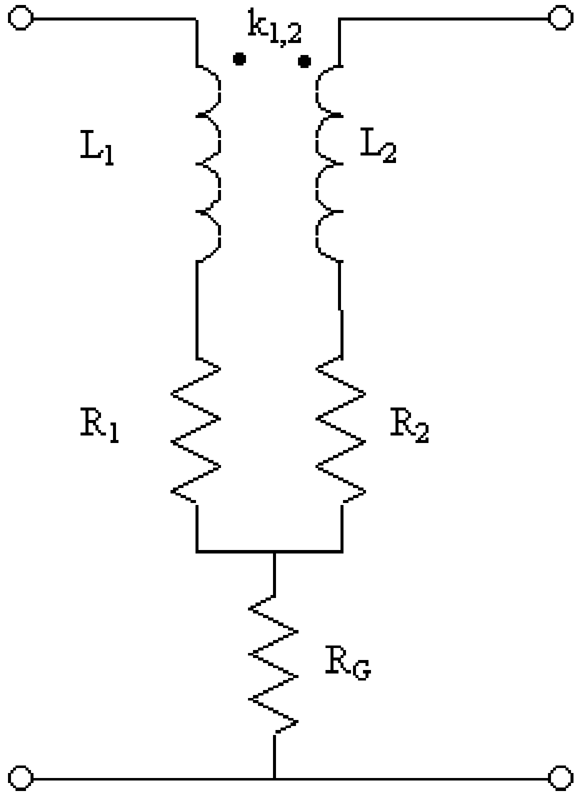
ASITIC: Semplice Sessione

- Square Planar Transformer (2/2)

```
ASITIC>  k2 1.2 t-s t-p

lambda = 62500.00, delta =  2.52
maxL = 3125.00, maxT =  2.01, maxW =  2.01
Generating inductance matrix (160x160)..
Inverting matrix......
L(T-S,T-S) =    3.34111 nH      R(T-S,T-S) = 5.135
L(T-S,T-P) =    2.66867 nH      R(T-S,T-P) = 0.300
L(T-P,T-P) =    3.34187 nH      R(T-P,T-P) = 5.404

ASITIC>  calctrans t-s t-p 2

lambda = 37500.00, delta =  1.95
maxL = 1875.00, maxT =  1.56, maxW =  1.56
Performing Analysis at 2.00 GHz
Generating capacitance matrix (160x160)...
Generating inductance matrix (192x192)..
Inverting matrix......
Narrowband Model at f=2.00 GHz:
L1=   3.4  R1=  5.16  L2=   3.4 R2=  5.44 M=  2.73 (k= 0.805) Re(Z12) =  0.818
```

ASITIC: Semplice Sessione

- circuito equivalente trasformatore



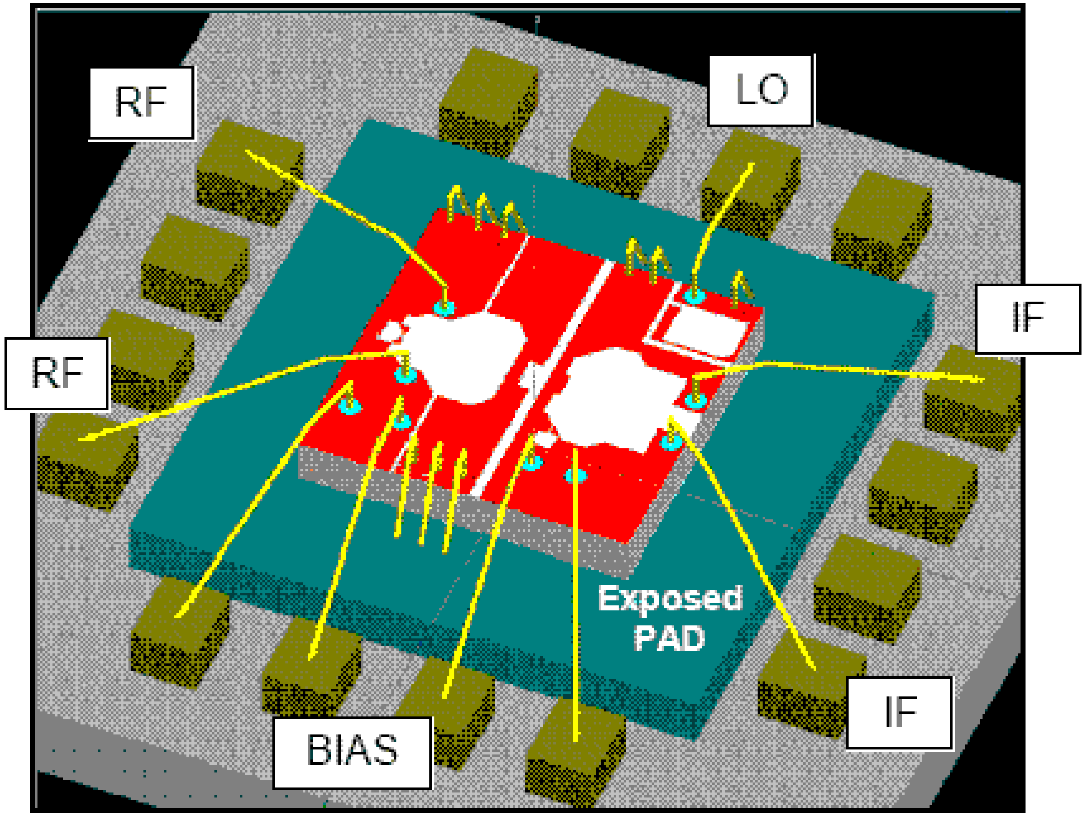
Riepilogo

- Importanza della simulazione EM
- Introduzione ai simulatori EM
- Alcuni simulatori per applicazioni RF
- ASITIC: Semplice sessione

Conclusioni

- Alle alte frequenze la simulazione EM è necessaria (i modelli analitici sono insufficienti)
- Simulatori 2D più rapidi e meno complessi dei 3D e la scelta dipende dal fenomeno e dalla geometria:
  - ❑Strutture planari (Induttori, microstrip, etc): 2D
  - ❑Strutture multi-layer (trasformatori, etc): 2D/3D
  - ❑Packaging: 3D

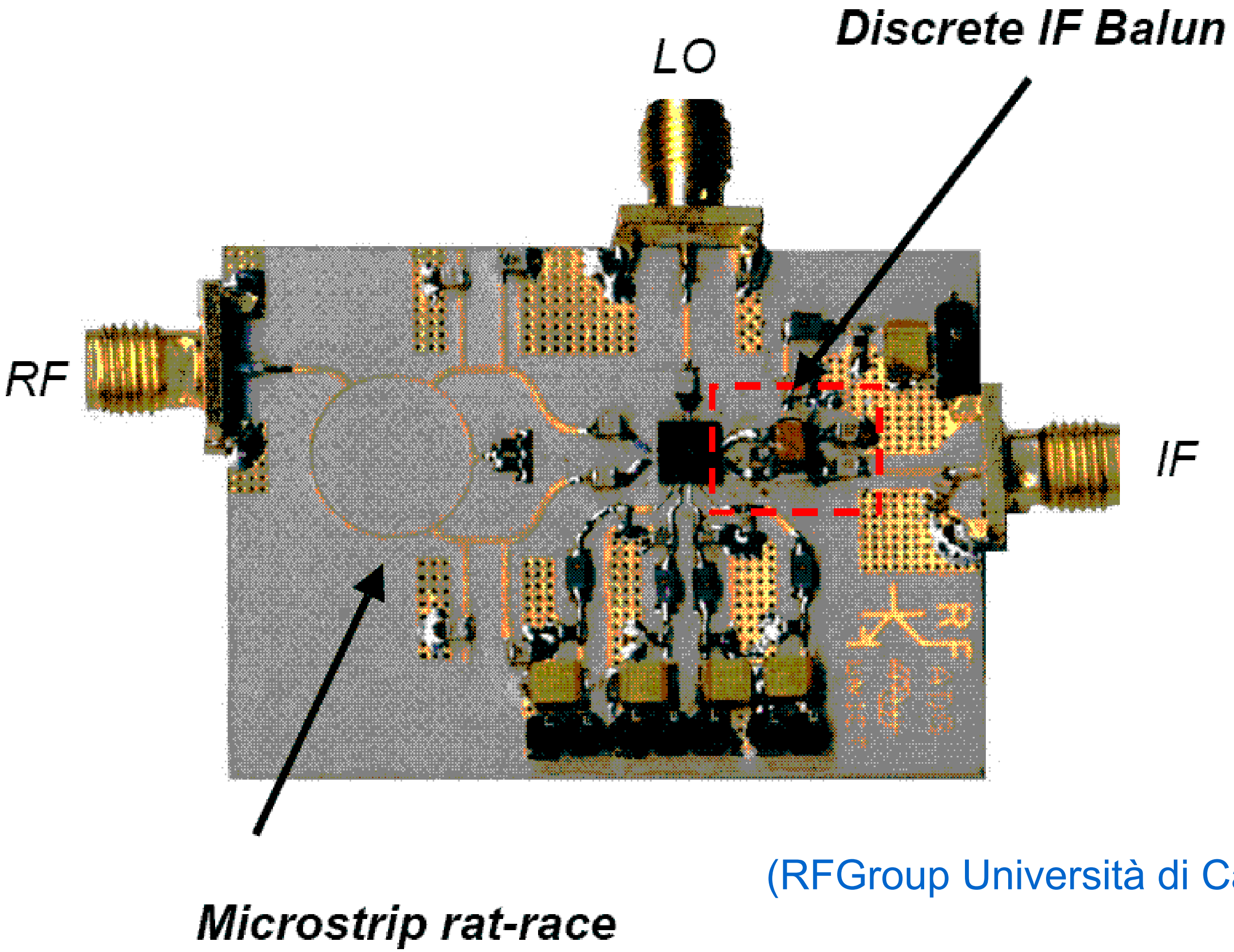
Esempio: 3D Packaging Modeling



- Bonding wire
- EM coupling

(RFGroup Università di Catania)

Esempio: Test Board a microstriscia



(RFGroup Università di Catania)

Riferimenti

- **Antenna Theory (analysis and design)** – C. Balanis

- **Field Theory of Guided Waves, 2/e** – R. Collin

- **ASITIC:**
  http://formosa.eecs.berkeley.edu/~niknejad/asitic.html