

Sistemi Microelettromeccanici

Università degli studi di Roma
"La Sapienza"



Progettazione di una capacità variabile in tecnologia MEMS

μ Tek Corporation

Paolo Croene - Fabrizio Del Grosso - Lorenzo Magliocchetti - Arrigo Marchiori

Michele Marino - Paolo Stegagno - Francesco Vecchioli

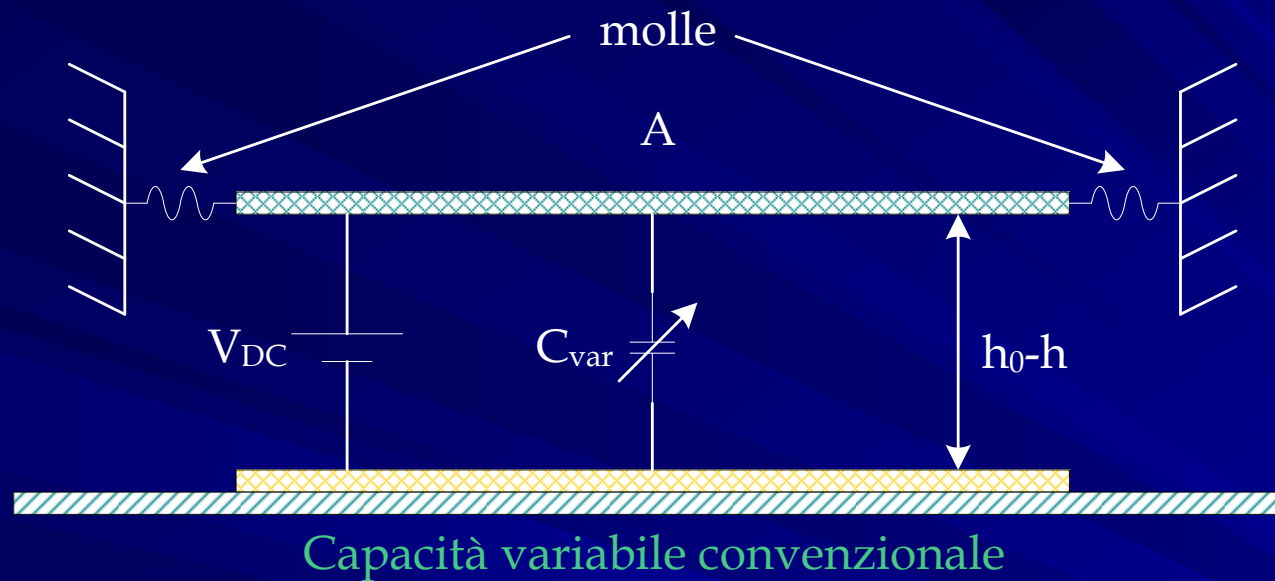
Prof. Marco Balucani

Ing. Rocco Crescenzi

A.A.2006-2007



Introduzione al progetto



$$C_{var} = \frac{\epsilon A}{h_0 - h}$$

$$50 \text{ fF} \leq C_{var} \leq 100 \text{ fF}$$

Forza elettrostatica:

$$F_e = \frac{1}{2} \left[\frac{C_{var} V_{DC}^2}{(h_0 - h)} \right]$$

Considerazione della forza elettrostatica come una forza elastica:

$$F_e = K_e (h_0 - h)$$

$$k_e = \left| \frac{\partial F_e}{\partial (h_0 - h)} \right| = \frac{C_{var} V_{DC}^2}{2(h_0 - h)^2}$$

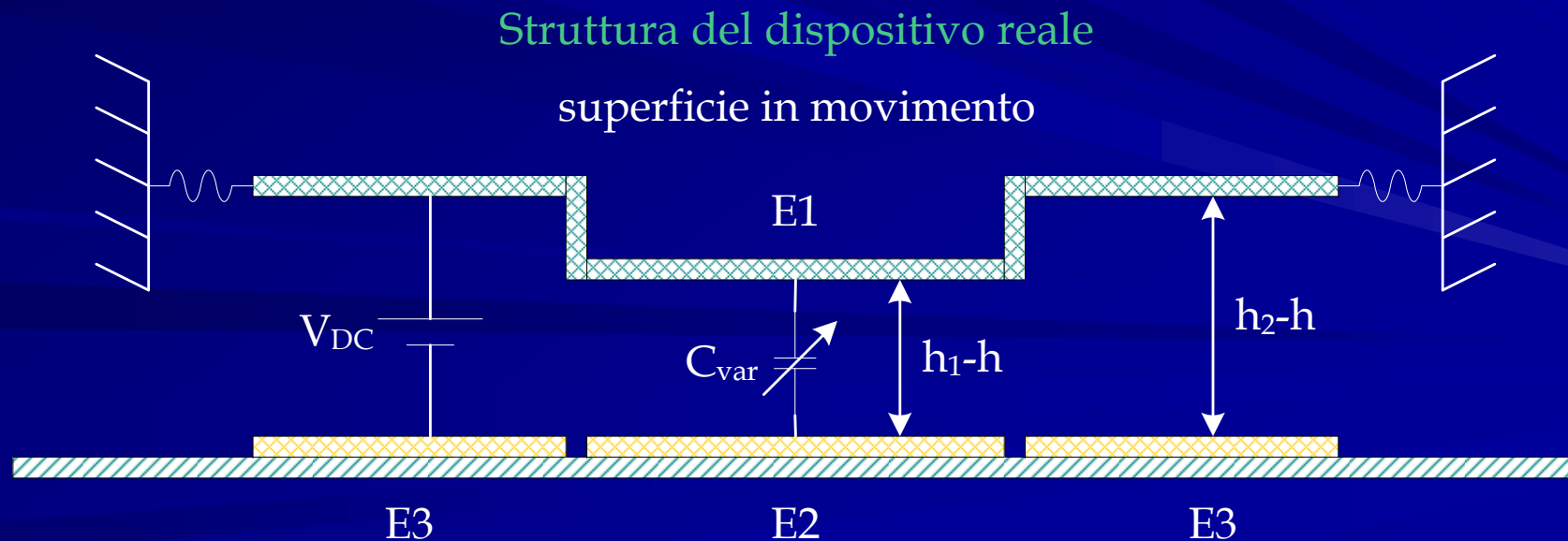


Introduzione al progetto

Forza di richiamo molle: $F_m = 2K_m h$

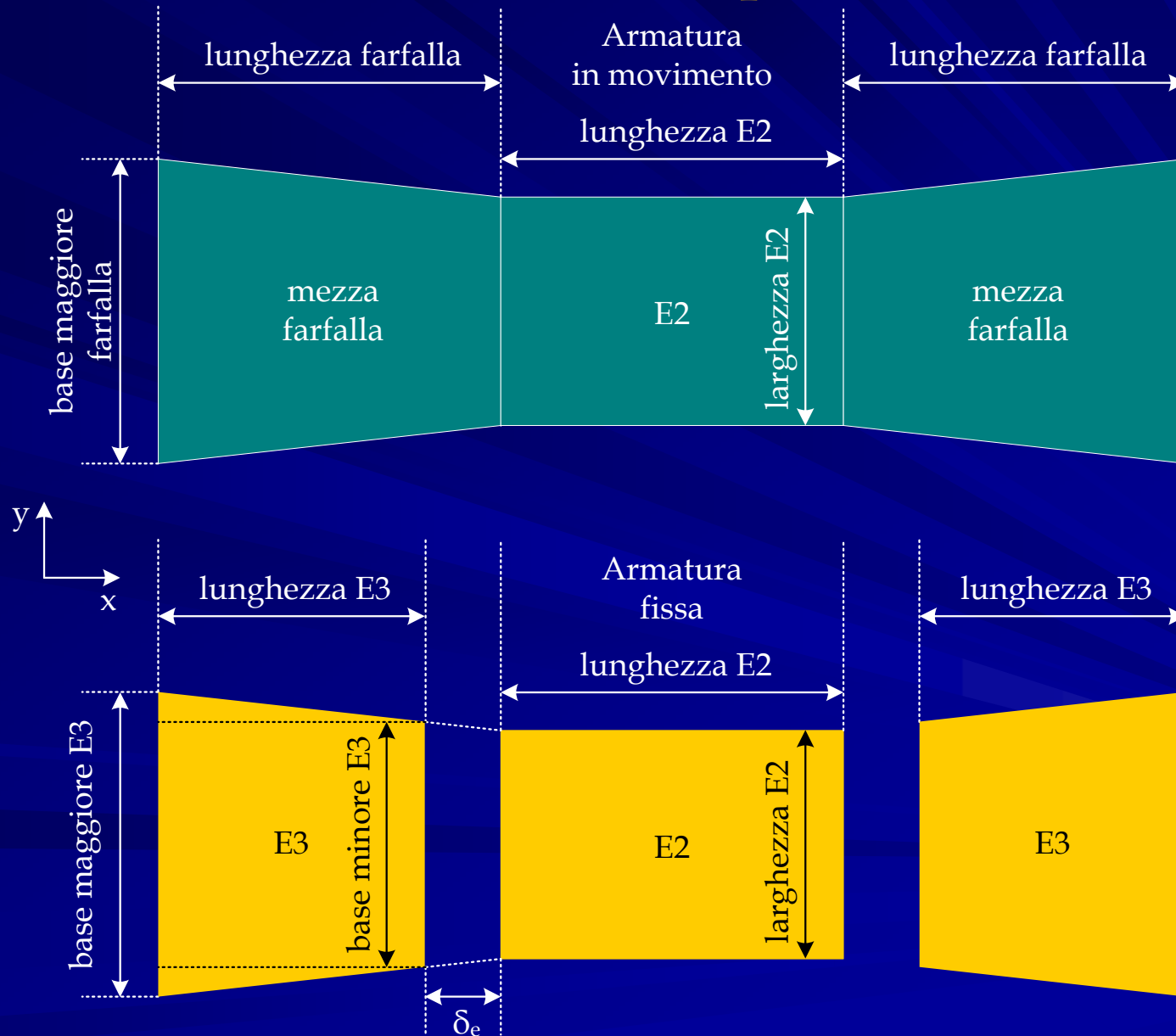
All'equilibrio: $F_m = F_e \Rightarrow k_e = \frac{2k_m h}{h_0 - h}$

$k_e = k_m$ per $h = \frac{h_0}{3} \rightarrow$ Tensione di Pull-in



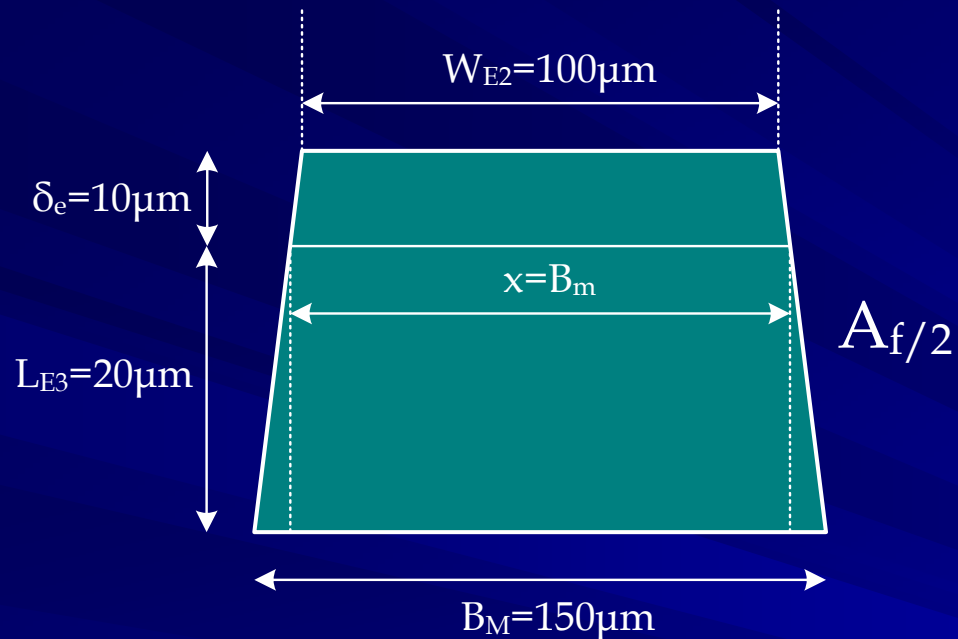


Struttura del dispositivo





Struttura del dispositivo



Lunghezza E2 = $80\mu\text{m} = L_{E2}$
Larghezza E2 = $100\mu\text{m} = W_{E2}$
Lunghezza E3 = $20\mu\text{m} = L_{E3}$
Base maggiore E3 = $150\mu\text{m} = B_M$
Base minore E3 = $117\mu\text{m} = B_m$

In questo modo il componente assume una forma più quadrata

Maggiore densità di integrazione

Essendo il momento $M = F * b$, a parità di momento M sull'armatura sospesa, la forza esercitata sulle travi diminuisce

$$A_{E2} = 8000 \mu\text{m}^2$$

$$A_{E3} = 5340 \mu\text{m}^2$$



Dimensionamento struttura

Altezza massima e minima dell'armatura E1:

$$\left. \begin{aligned} h_{1MAX} &= \frac{\varepsilon_0 A_{E2}}{C_{\min}} = 1.4 \mu m \\ h_{1\min} &= \frac{\varepsilon_0 A_{E2}}{C_{MAX}} = 0.7 \mu m \end{aligned} \right\} \delta h = 0.7 \mu m$$

Condizione per evitare il pull-in: $\delta h < \frac{h_2}{3} \Rightarrow h_2 > 2.1 \mu m \Rightarrow h_2 = 2.3 \mu m$

Capacità tra le armature E3 e l'armatura E1: $C_{E3} = \frac{\varepsilon_0 \cdot A_{E3}}{h_2 - \delta h} = 41.5 \text{ fF}$

forza elettrostatica

e

forza peso

$$\left. \begin{aligned} F_e &= 1.87 \mu N \\ F_p &= 2.537 \text{ nN} \end{aligned} \right\} \Rightarrow F_p \text{ trascurabile}$$



Dimensionamento struttura

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = 0 \Rightarrow \text{integrando quattro volte} \Rightarrow w(x) = A + Bx + \frac{1}{2} Cx^2 + \frac{1}{6} Dx^3$$

$$w|_{x=0} = 0$$

$$w'|_{x=0} = 0$$

Condizioni al contorno:

$$M|_{x=L} = -EI \frac{d^2 w}{dx^2} \Big|_{x=L} = 0$$

$$T|_{x=L} = -EI \frac{d^3 w}{dx^3} \Big|_{x=L} = F$$

Scostamento della trave in funzione di x: $w(x) = \left(\frac{FL}{2EI} \right) x^2 - \frac{1}{6} \left(\frac{F}{EI} \right) x^3$

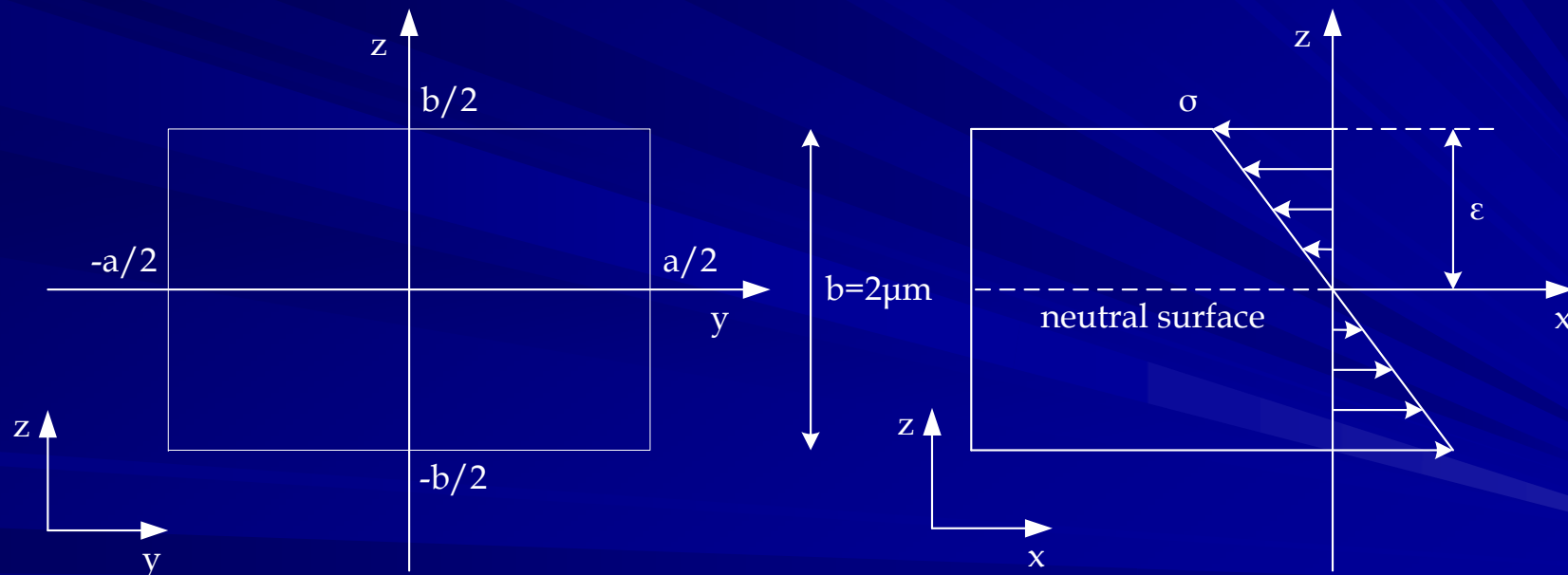
Scostamento massimo all'estremità della trave (x=L): $w(L) = \frac{1}{3} \left(\frac{F}{EI} \right) L^3 \Rightarrow L^3 \sqrt{\frac{3w(L)EI}{F}}$



Dimensionamento struttura

Forza elettrostatica ripartita sulle quattro travi: $F = \frac{F_e}{4}$

Momento di inerzia della trave lungo l'asse y



$$I_{yy} = \int_{-b/2}^{b/2} (az^2) dz = \frac{ab^3}{12}$$



Calcolo stress sulle travi

$$\text{Calcolo lunghezza trave: } L = \sqrt[3]{\frac{Eab^3}{F_e} \delta h} \quad \left\{ \begin{array}{l} a = 3 \mu m \\ b = 2 \mu m \\ E = 207 GPa \\ \delta h = 0.7 \mu m \end{array} \right.$$

$$\text{Deformazione trave: } \varepsilon_x = -\frac{z}{\rho} \Rightarrow \frac{1}{\rho} = w''(x) \Rightarrow \varepsilon_x = -\left[\frac{F_e}{4EI} (L-x) \right] z$$

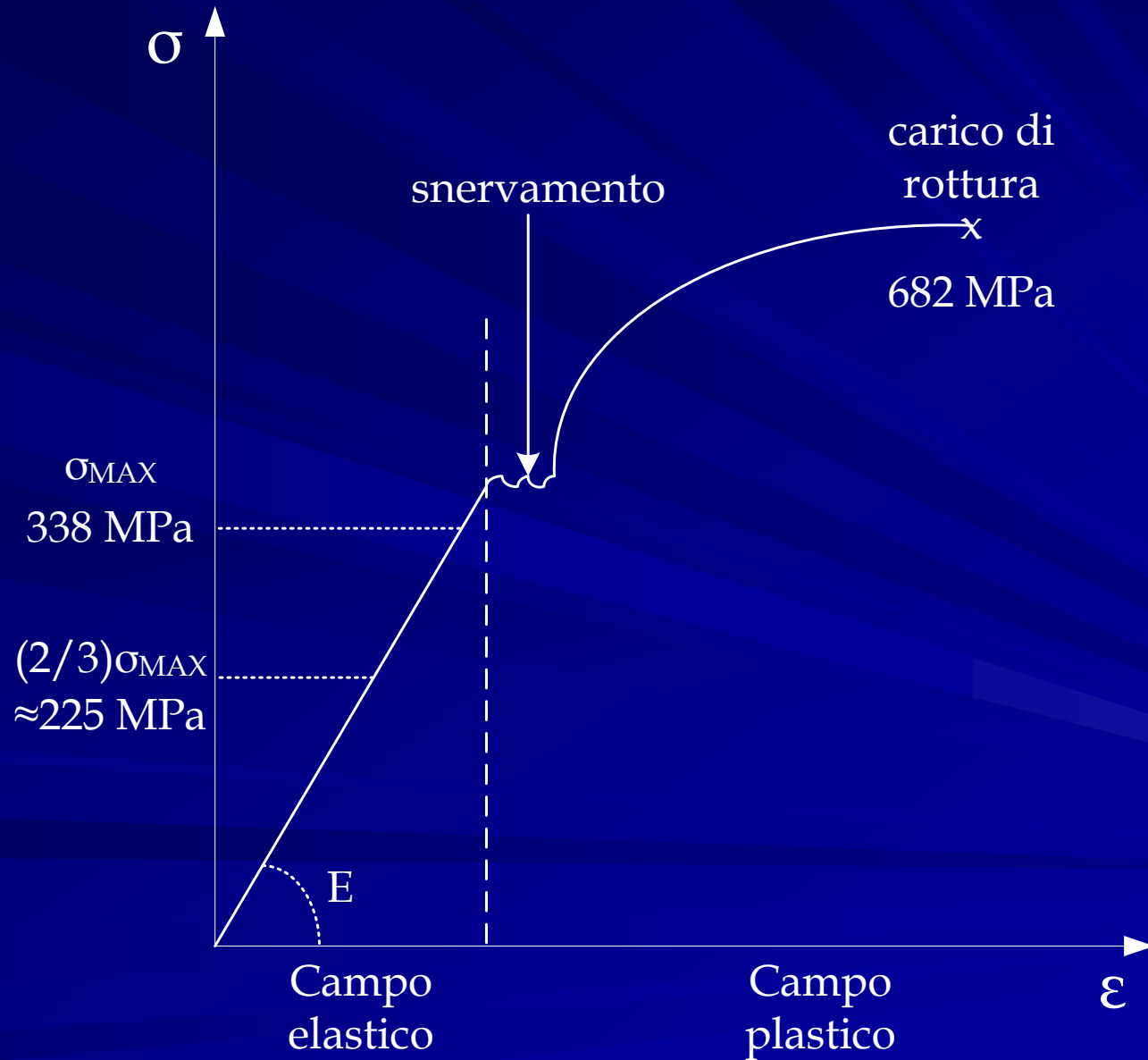
$$\text{Sforzi sulla trave: } \sigma(x, z) = E \cdot \varepsilon_x = -\left[\frac{F_e}{4I} (L-x) \right] z$$

Sforzo massimo nel punto in cui la trave è incastrata ($x = 0$) e modulo di z massimo ($z = b/2$):

$$\sigma_{MAX} = \sigma\left(0, -\frac{b}{2}\right) = \frac{F_e L b}{8I} = 28.7 MPa$$

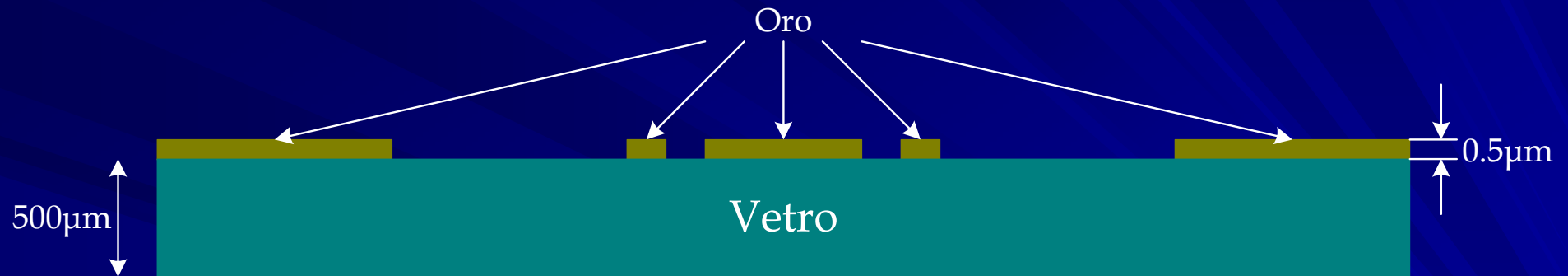


Calcolo stress sulle travi





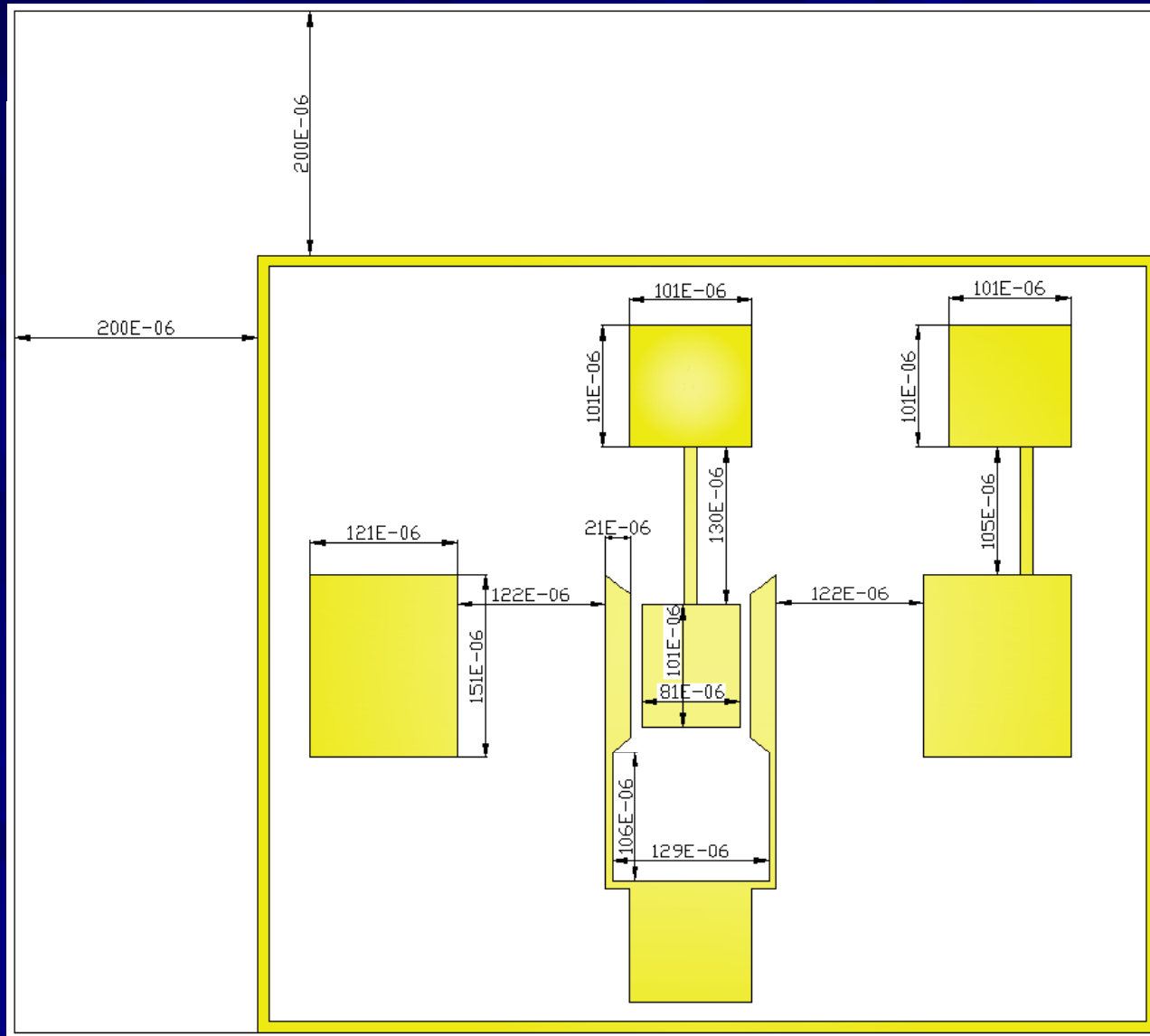
Passi di processo - Deposizione ed etching oro



- Applicazione resist AZ1518
 - Soft baking
- Esposizione “1x Contact Aligner”
 - Sviluppo “AZ”
 - Baking
- Etching bagnato
- Stripping organico
- Pulizia “Piranha”

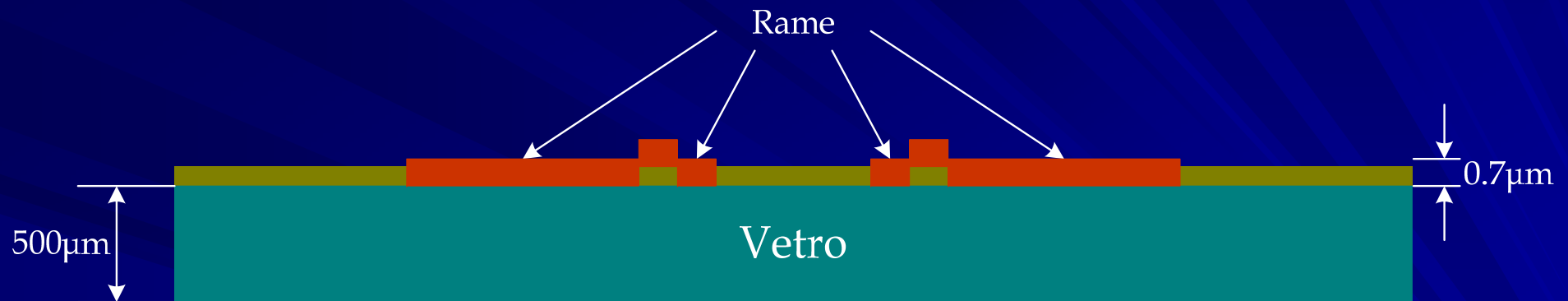


Passi di processo – Prima maschera





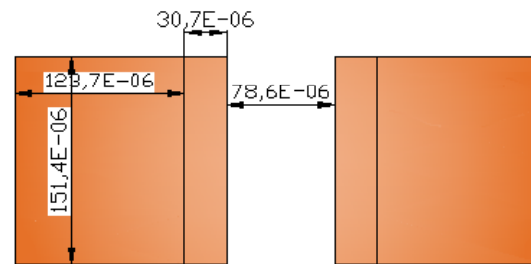
Passi di processo – Deposizione ed etching rame



- Applicazione resist AZ1518
 - Soft baking
- Esposizione "1x Contact Aligner"
 - Sviluppo "AZ"
 - Baking
- Etching bagnato "cloruro ferrico"
 - Stripping organico
 - Pulizia "Piranha"

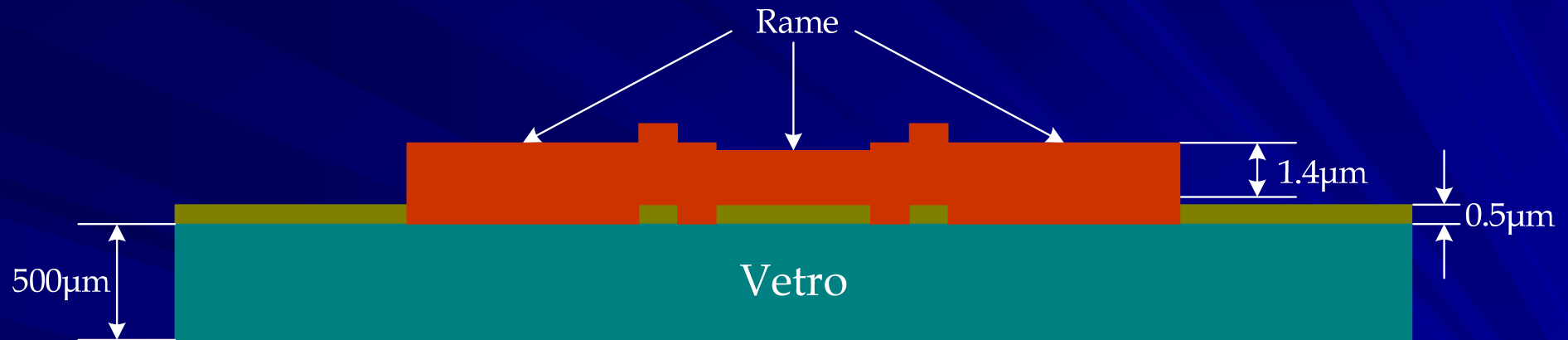


Passi di processo - Seconda maschera





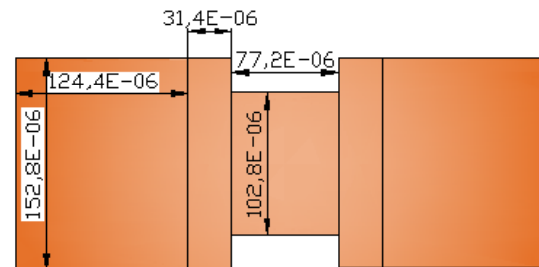
Passi di processo – Deposizione ed etching rame



- Applicazione resist AZ1518
 - Soft baking
- Esposizione "1x Contact Aligner"
 - Sviluppo "AZ"
 - Baking
- Etching bagnato "cloruro ferrico"
 - Stripping organico
 - Pulizia "Piranha"

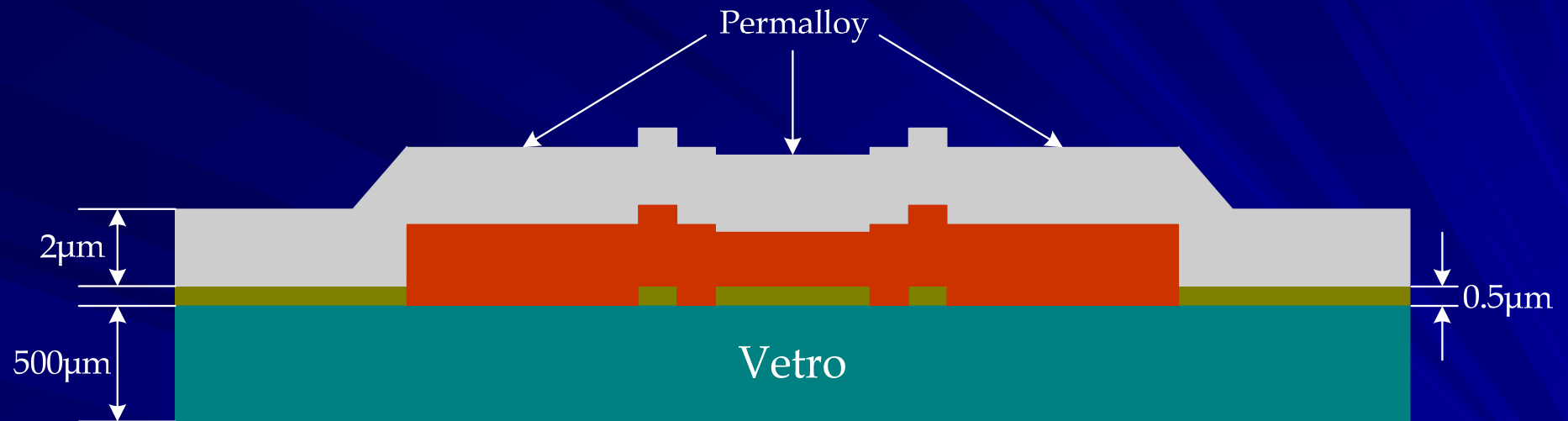


Passi di processo – Seconda maschera





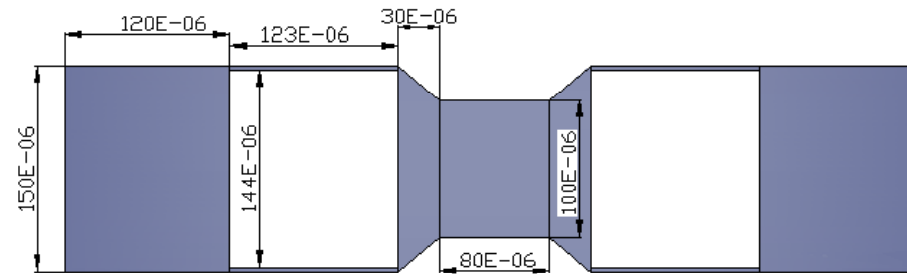
Passi di processo – Deposizione ed etching permalloy



- Applicazione resist AZ4620
 - Soft baking
- Esposizione "1x Contact Aligner"
 - Sviluppo "AZ"
 - Baking
- RIE al plasma
- Stripping organico
- Pulizia "Piranha"

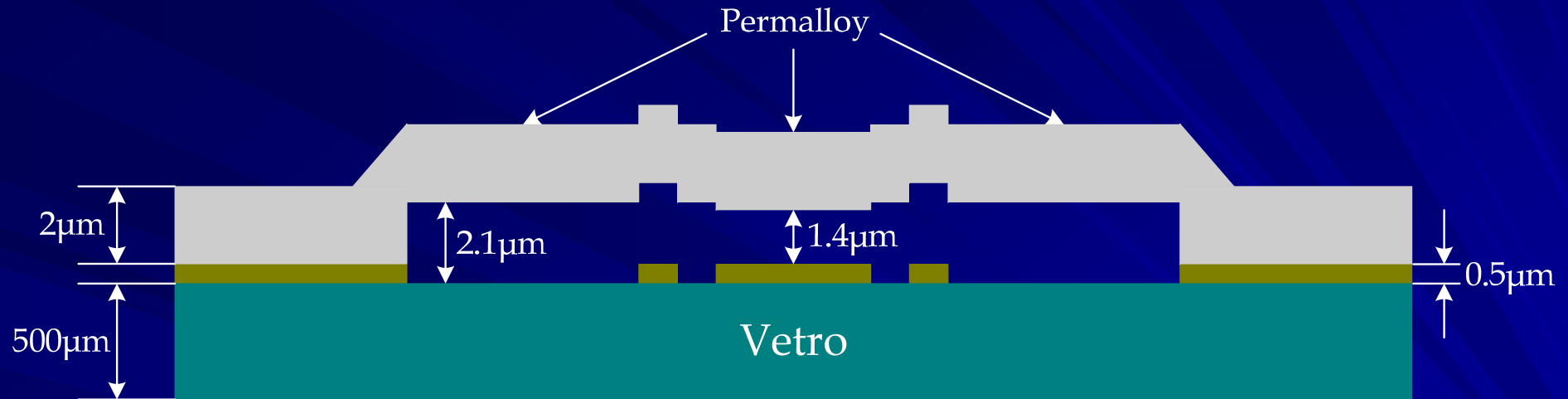


Passi di processo – Terza maschera





Passi di processo – Rimozione rame

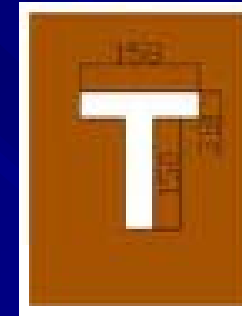
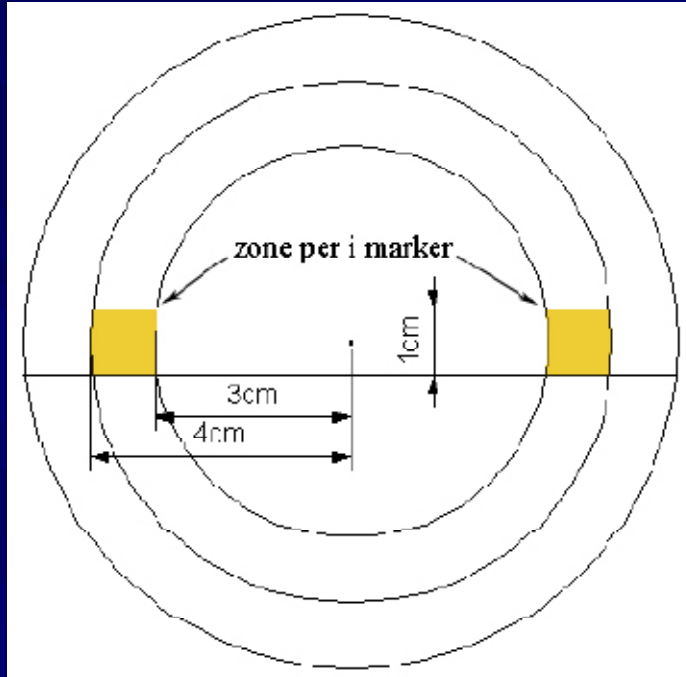


- Applicazione resist AZ1518
 - Soft baking
- Esposizione "1x Contact Aligner"
 - Sviluppo "AZ"
 - Baking
- Etching bagnato "cloruro ferrico"
 - Stripping organico
 - Pulizia "Piranha"

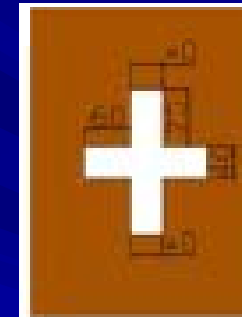


Passi di processo – Posizionamento marker

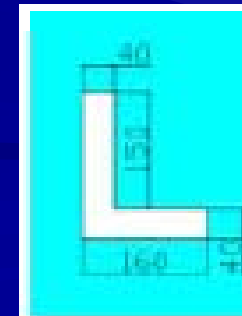
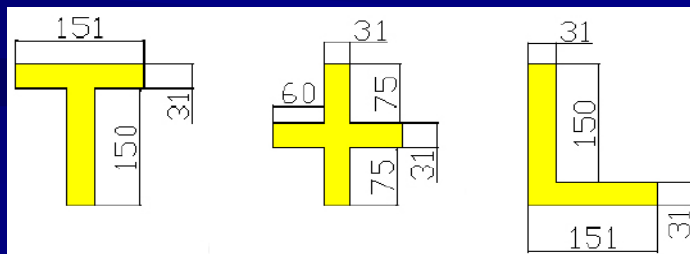
Marker sulla maschera relativa al 1° layer in rame



Marker sulla maschera relativa al 2° layer in rame



Marker sulla maschera relativa al layer in permalloy



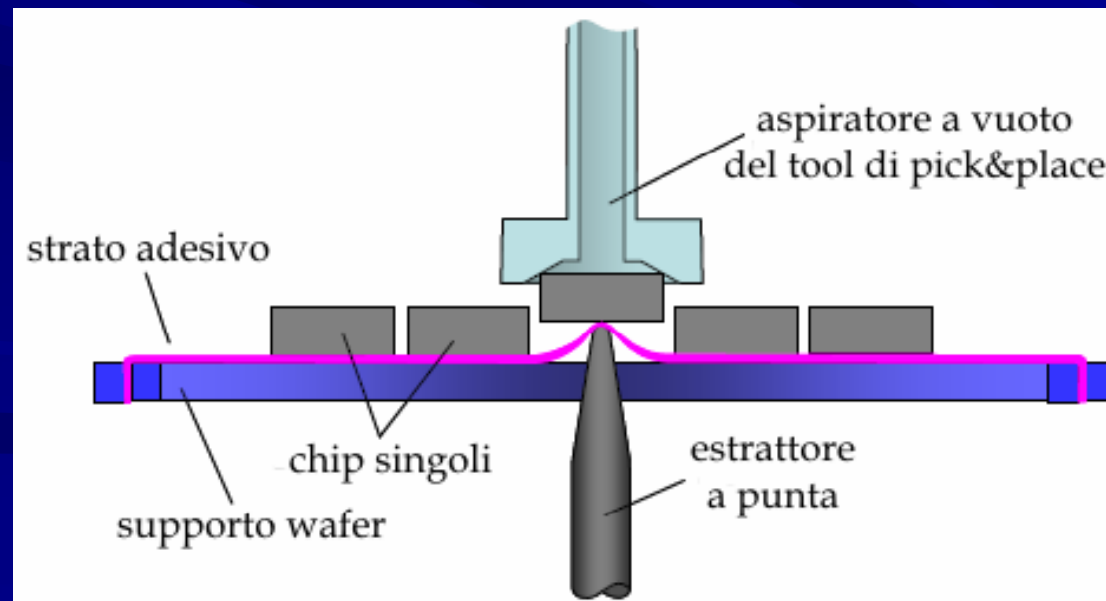
← Marker sulla maschera relativa al layer in oro



Separazione componenti – Dicing/Estrazione

- taglio del wafer lungo le scribe lines, usando una sega diamantata
- separazione dei singoli componenti

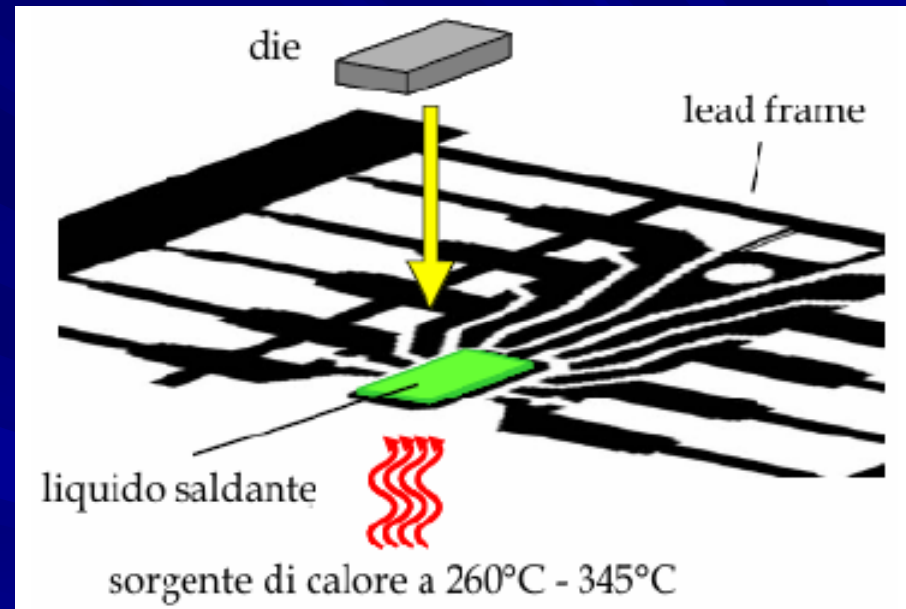
Macchina per l'estrazione dei singoli componenti



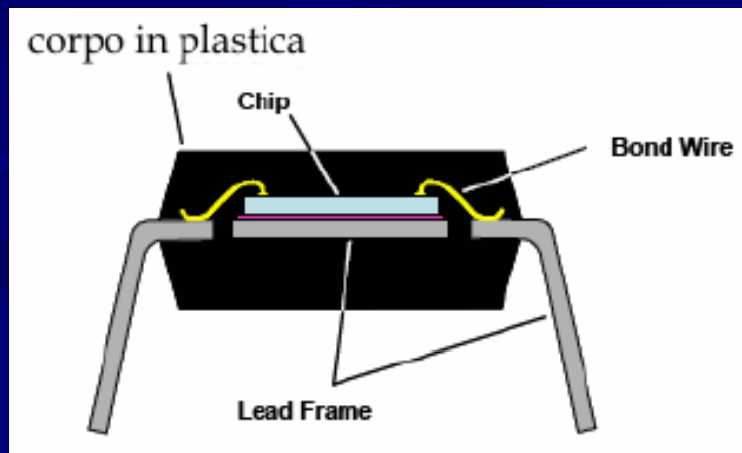


Separazione componenti – Die bond

Posizionamento del dispositivo sul lead frame



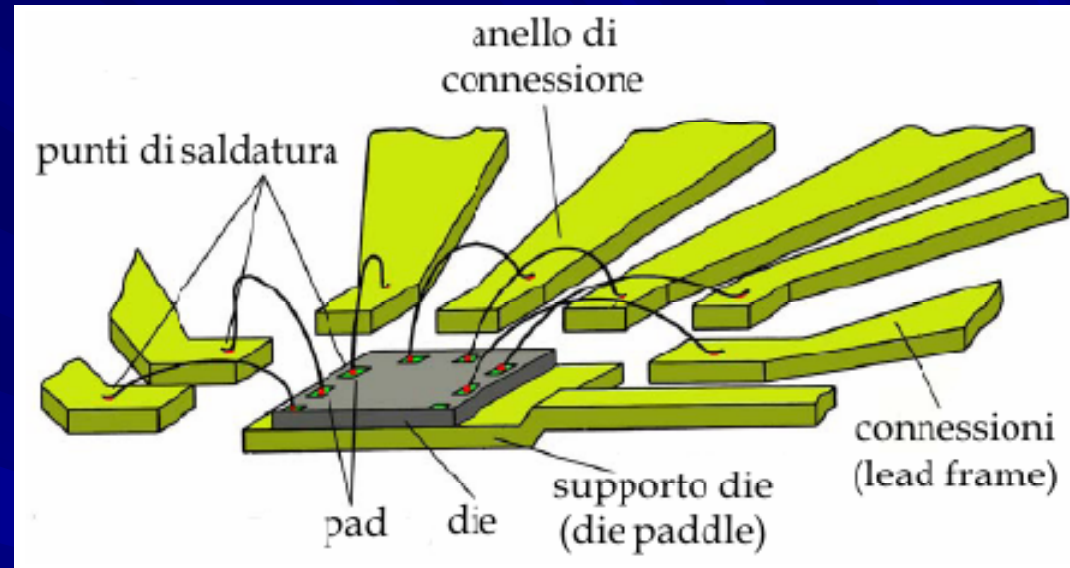
Package DIP



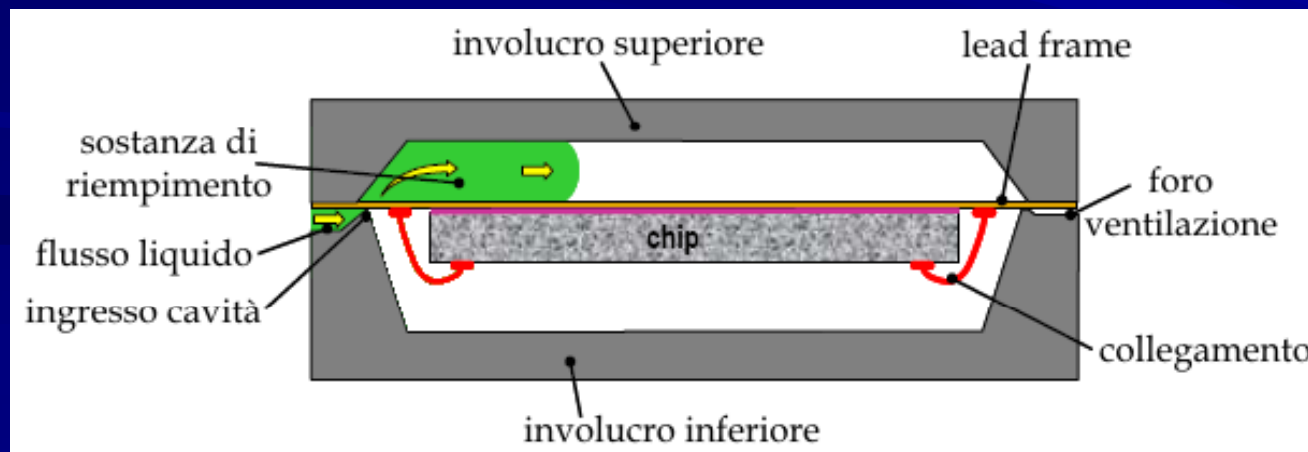


Separazione componenti – Wire bonding/Packaging

Collegamento del dispositivo verso i pin esterni



Creazione del package DIP





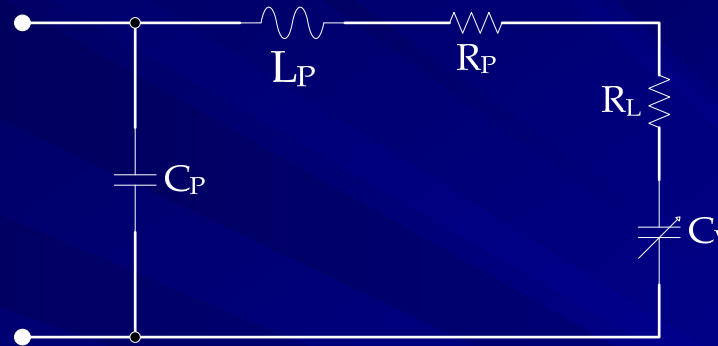
Simulazioni - Analisi AC

Circuito equivalente del dispositivo con package

$$C_P = 150\text{fF}$$

$$L_P = 2\text{nH}$$

$$R_P = 0.1\Omega$$

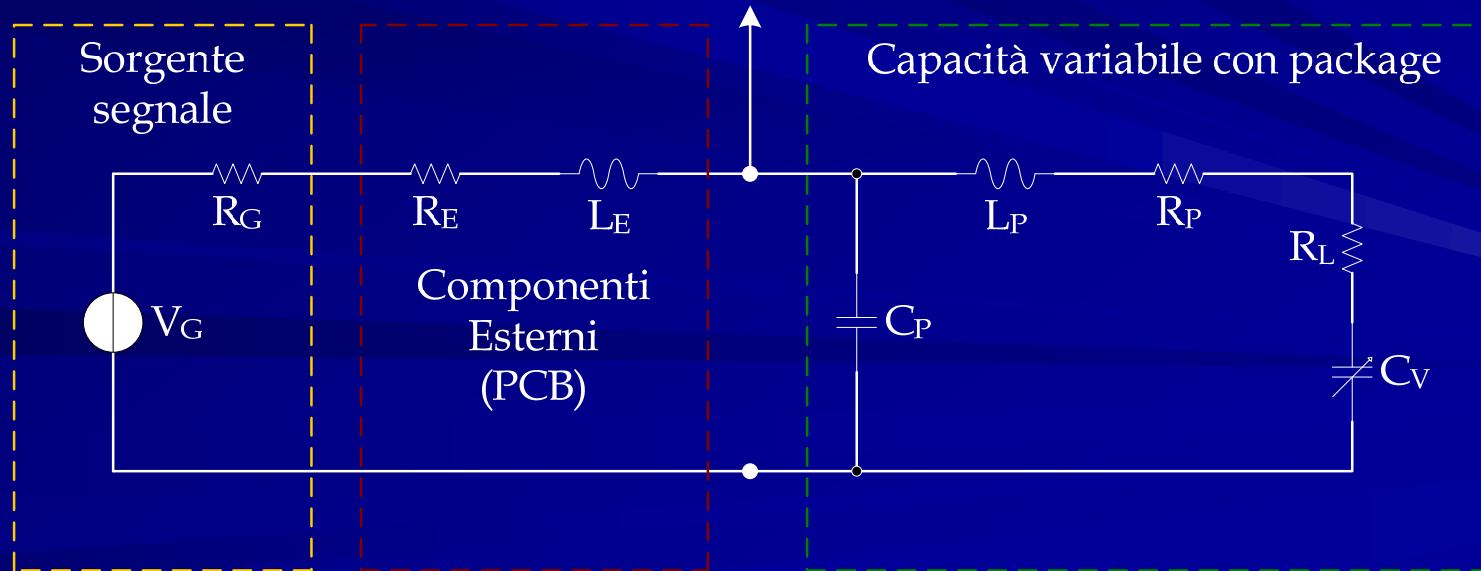


$$R_L \approx 1\Omega$$

$$50\text{fF} \leq C_V \leq 100\text{fF}$$

Circuito equivalente del filtro

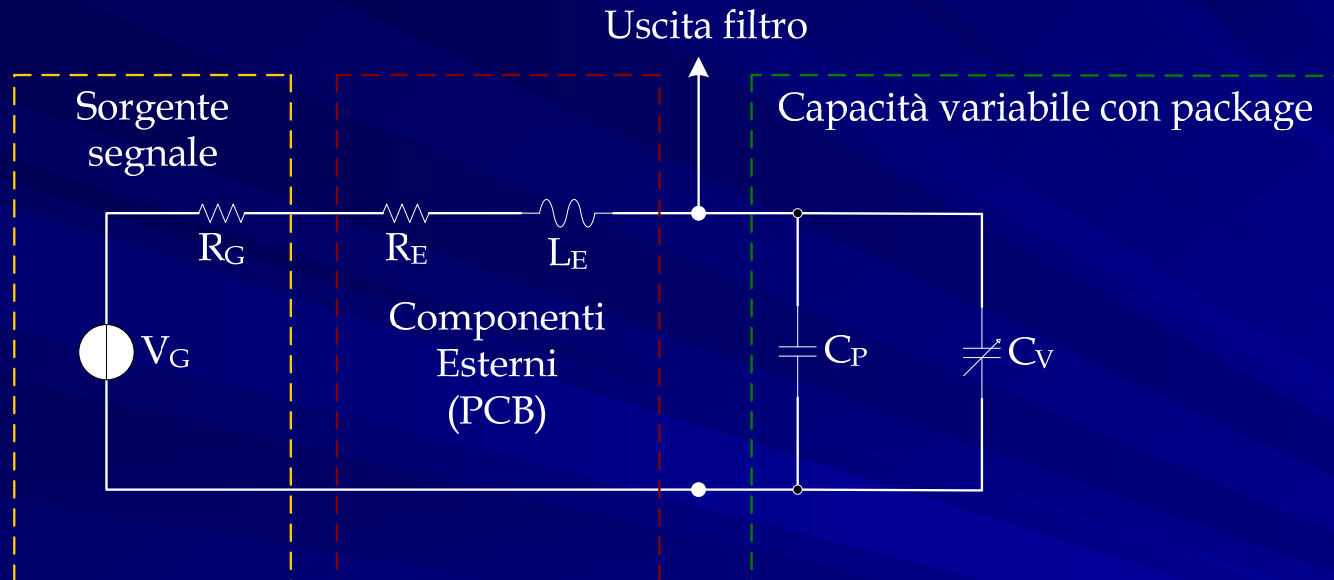
Uscita filtro





Simulazioni - Analisi AC

Circuito equivalente semplificato del filtro



$$I(\omega) = \frac{j\omega C V(\omega)}{1 + j\omega C R - \omega^2 L C}$$

$$C = C_P + C_{V_{\text{mid}}} = (150 + 75) \text{ fF} = 225 \text{ fF}$$

$$f_0 = 900 \text{ MHz}$$

Comportamento resistivo per: $1 - \omega^2 L C = 0 \Rightarrow \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L C}} \Rightarrow L_E = \frac{1}{\omega_0^2 C} \cong 139 \text{ nH}$

Due induttanze in serie da 100nH e 39nH

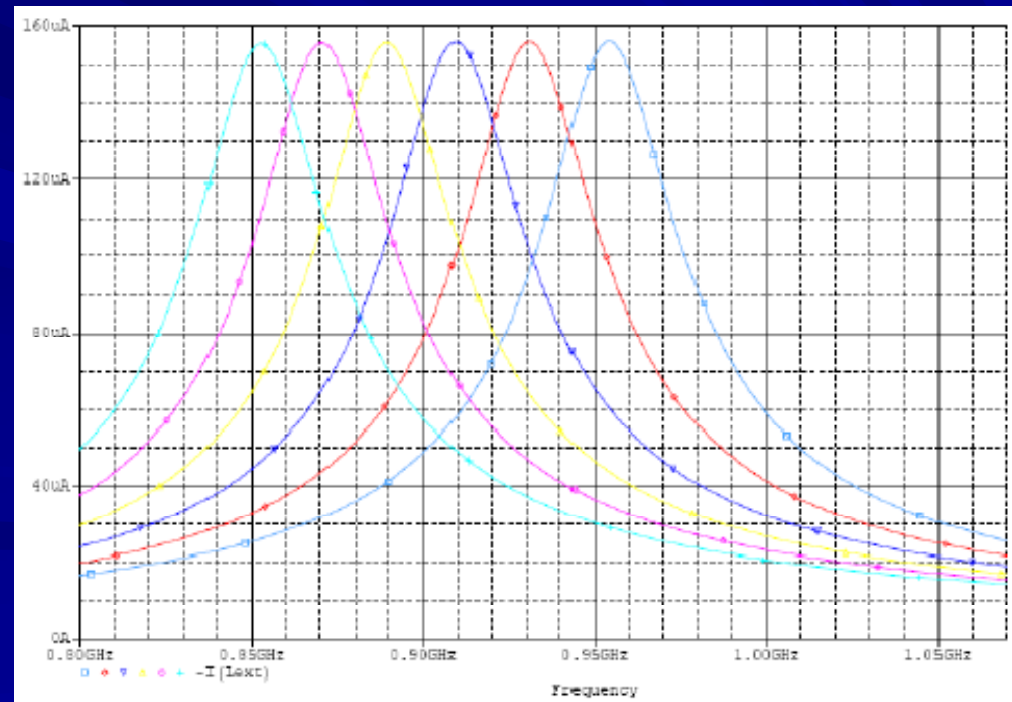
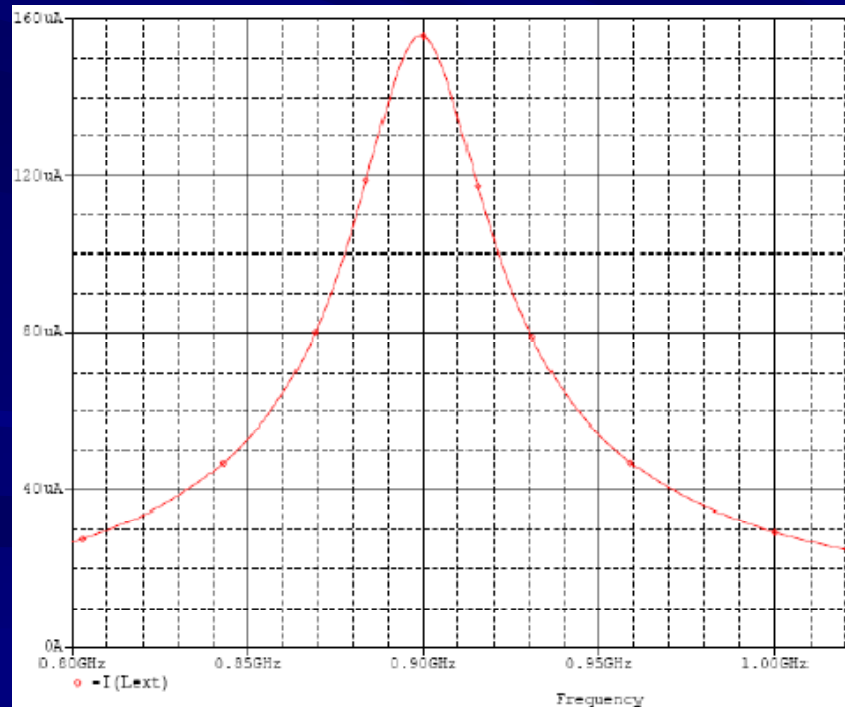


Simulazioni - Analisi AC

Poli complessi coniugati per: $Q > \frac{1}{2}$

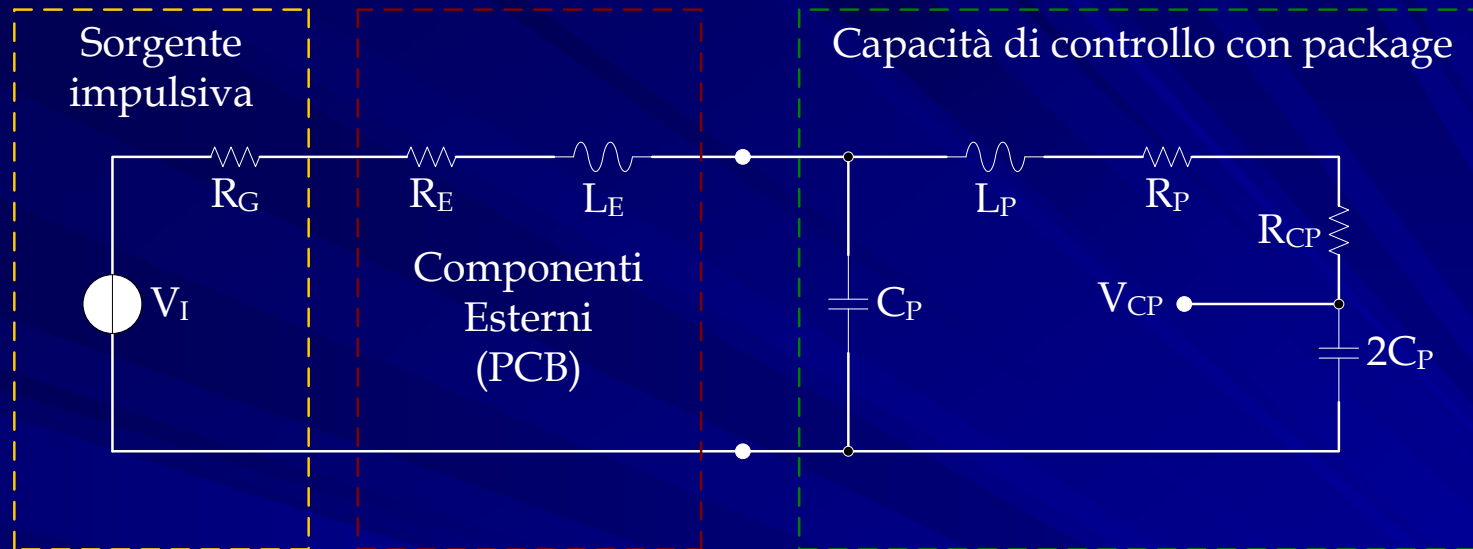
in genere $Q \geq 10 \rightarrow Q = 35$

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} \Rightarrow R_E = \frac{\omega_0 L}{Q} = 22.45\Omega \Rightarrow R_E = 22\Omega$$





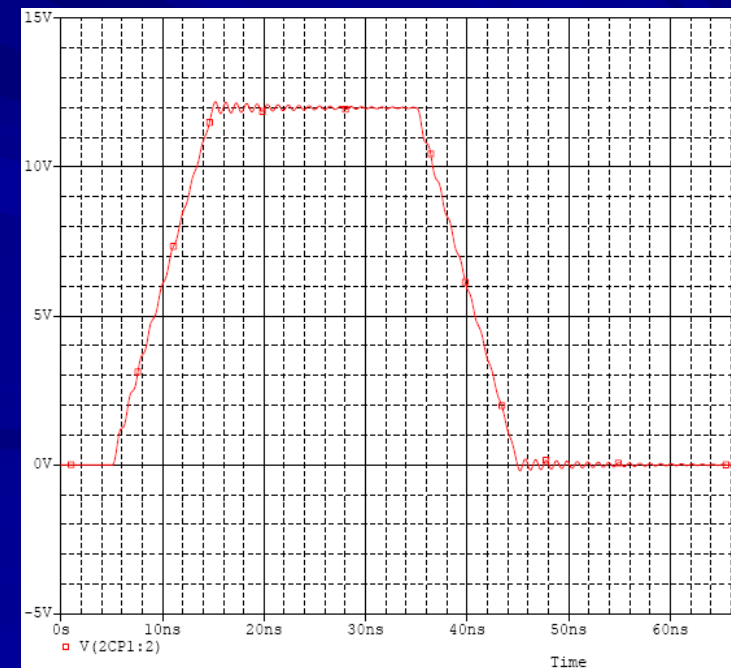
Simulazioni - Analisi transitoria



tempo di salita = 10ns
tempo di discesa = 10ns
larghezza impulso = 20ns
valore minimo dell'impulso = 0V
valore massimo dell'impulso = 12V

Overshoot massimo = 150mV

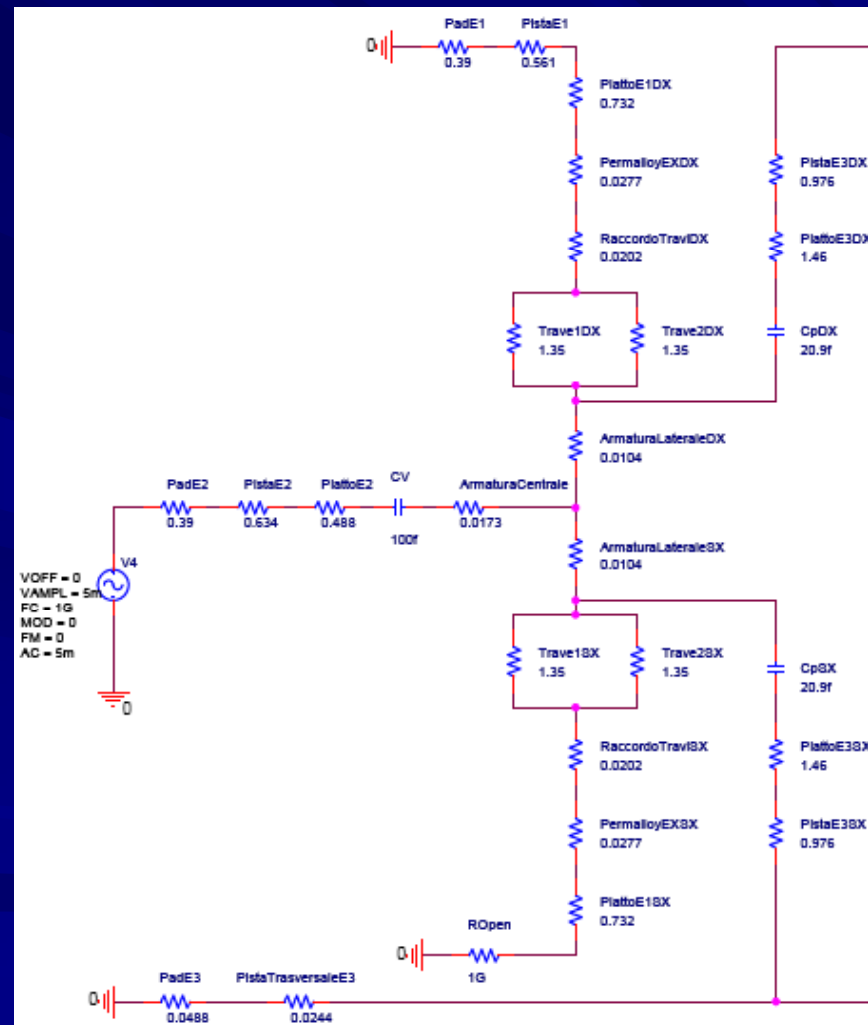
La tensione di controllo si assesta in circa 10ns





Simulazioni - Analisi termica

Circuito equivalente per il calcolo delle potenze in gioco



Potenze in gioco dell'ordine del pW



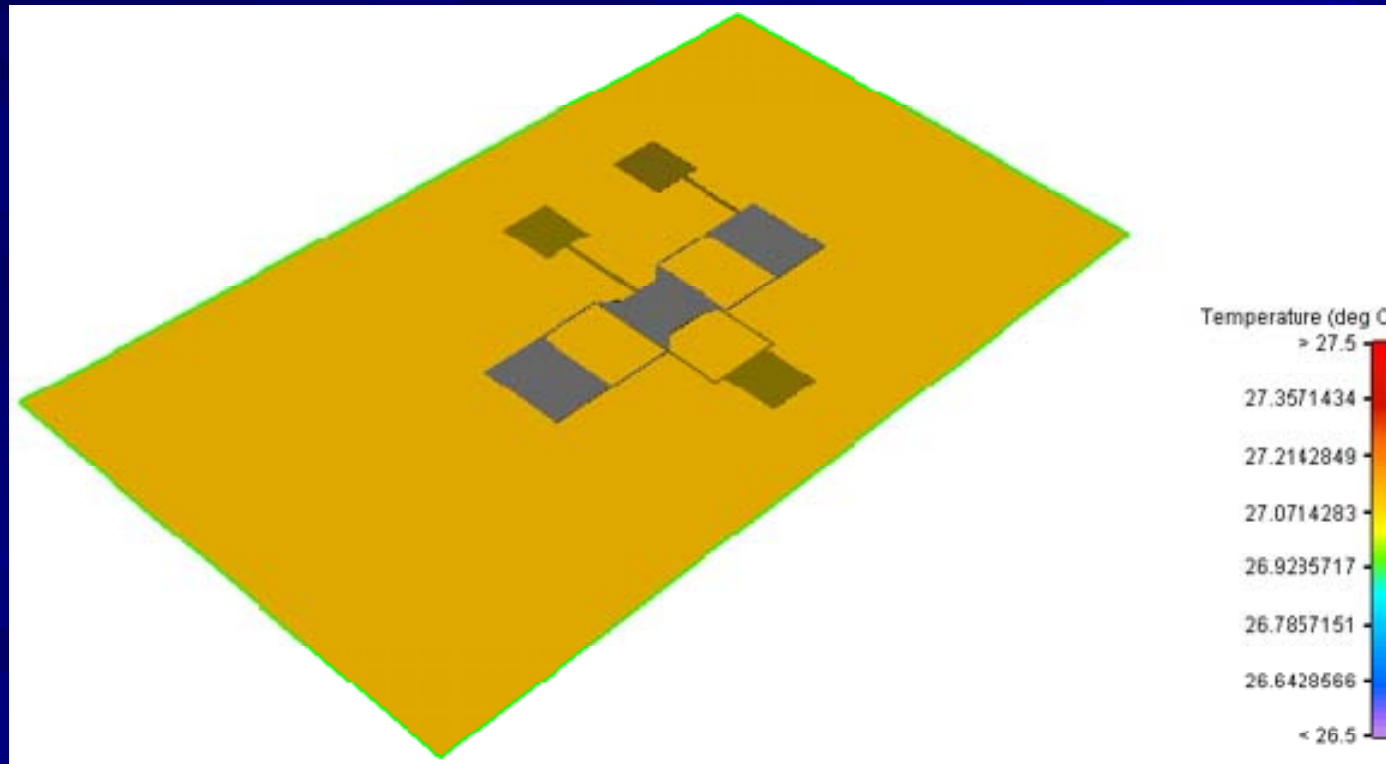
Simulazioni - Analisi termica

Dominio di simulazione (package SC70/4 pin):

$$x = 1.6mm$$

$$y = 0.8636mm$$

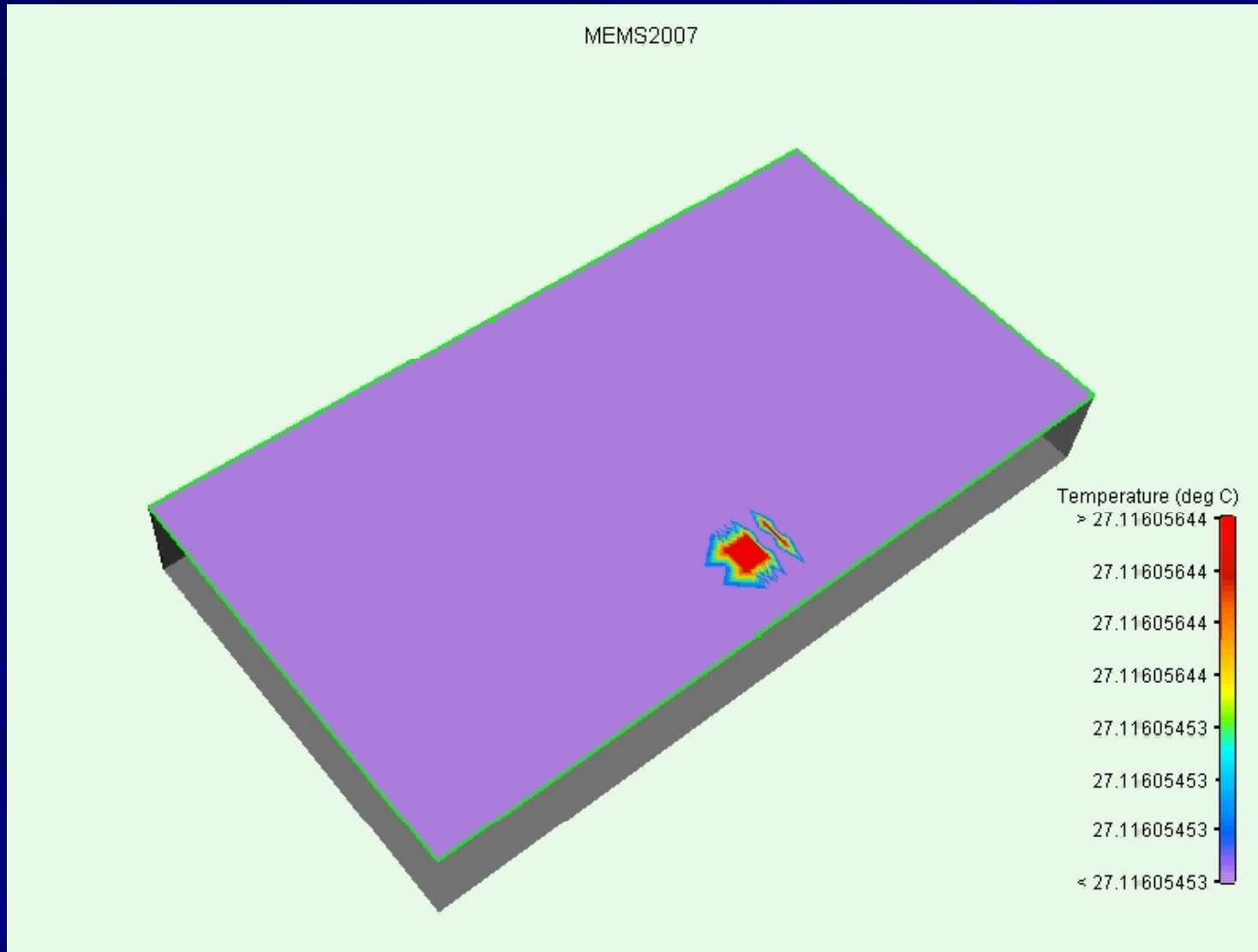
$$z = 0.2mm$$





Simulazioni - Analisi termica

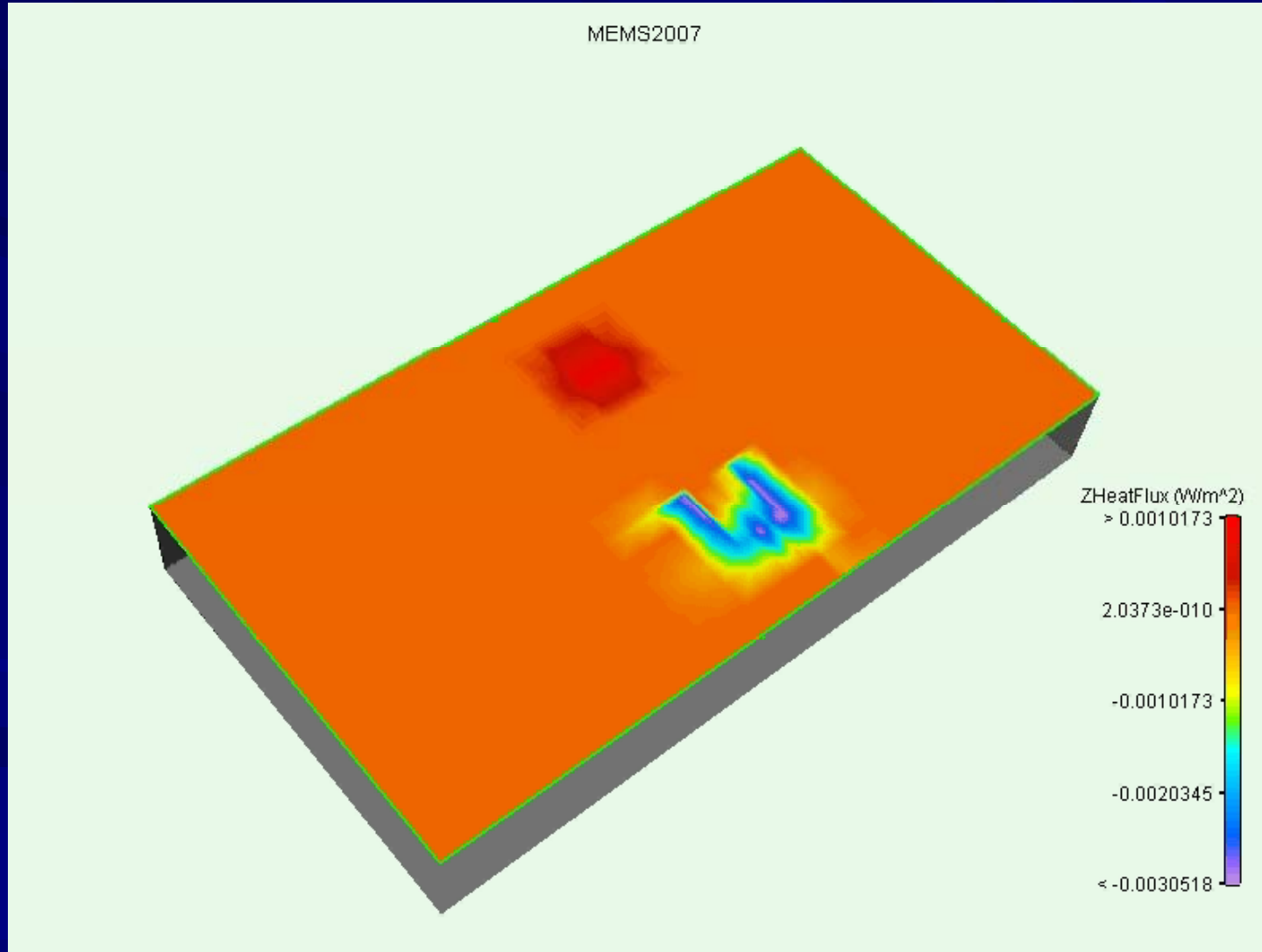
Distribuzione del calore sulla struttura





Simulazioni - Analisi termica

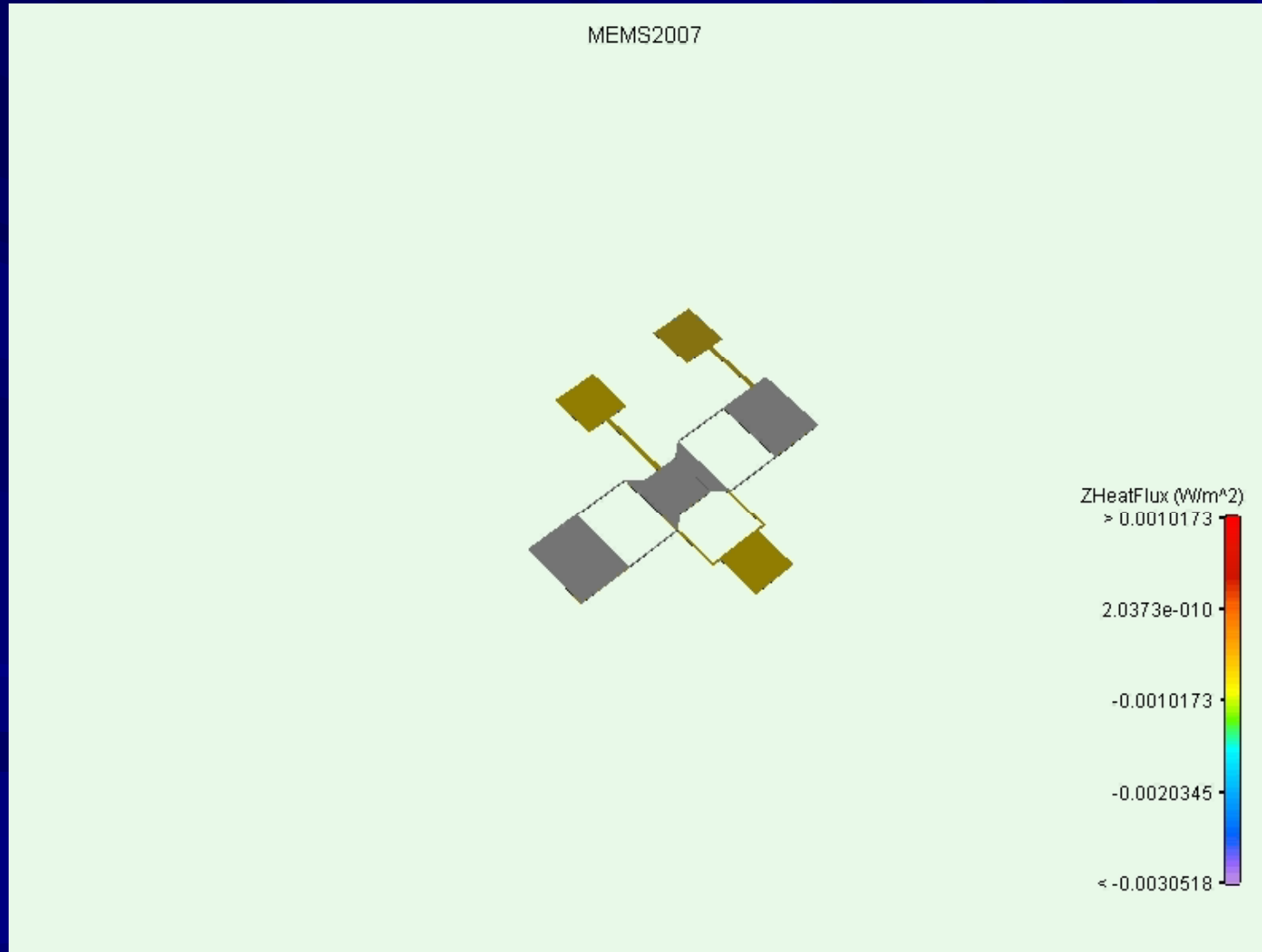
Distribuzione del calore sulla struttura lungo l'asse z





Simulazioni - Analisi termica

Distribuzione del calore sulla struttura lungo l'asse z





Stima dei costi

Tabella dei costi per l'evaporazione dell'oro

Costi fonderia		
Primi 1000 Å	\$ 100,00	
Å addizionali	\$ 0,065	
Passo di processo	Costo per lotto	Costo totale
Costo set-up		\$ 150,00
Evaporazione	\$ 360,00	\$ 360,00
Totale		\$ 510,00

Tabella dei costi per la prima litografia

Passo di processo	Per wafer	Per lotto	Totale
Maschera “Soda Lime”			\$ 450,00
Applicazione resist AZ1518	\$ 5,00		\$ 125,00
Esp. “1x Contact Aligner”	\$ 7,00		\$ 175,00
Sviluppo “AZ”		\$ 20,00	\$ 20,00
Soft baking		\$ 25,00	\$ 25,00
Etching bagnato dell'oro		\$ 35,00	\$ 35,00
Stripping resist organico		\$ 50,00	\$ 50,00
Pulizia “Piranha”		\$ 50,00	\$ 50,00
Totale			\$ 930,00



Stima dei costi

Tabella dei costi per l'evaporazione del rame

Costi fonderia		
Primi 1000 Å	\$ 30,00	
Å addizionali	\$ 0,015	
Passo di processo	Costo per lotto	Costo totale
Costo set-up		\$ 150,00
Evaporazione	\$ 120,00	\$ 120,00
Totale		\$ 270,00

Tabella dei costi per la seconda e terza litografia

Passo di processo	Per wafer	Per lotto	Totale
Maschera “Soda Lime”			\$ 450,00
Applicazione resist AZ1518	\$ 5,00		\$ 125,00
Esp. “1x Contact Aligner”	\$ 7,00		\$ 175,00
Sviluppo “AZ”		\$ 20,00	\$ 20,00
Soft baking		\$ 25,00	\$ 25,00
Etching bagnato del rame		\$ 25,00	\$ 25,00
Stripping resist organico		\$ 50,00	\$ 50,00
Pulizia “Piranha”		\$ 50,00	\$ 50,00
Totale			\$ 920,00



Stima dei costi

Tabella dei costi per l'evaporazione del rame

Costi fonderia		
Primi 1000 Å	\$ 30,00	
Å addizionali	\$ 0,015	
Passo di processo	Costo per lotto	Costo totale
Costo set-up		\$ 150,00
Evaporazione	\$ 225,00	\$ 225,00
Totale		\$ 375,00

Tabella dei costi per l'evaporazione del permalloy

Costi fonderia		
Primi 1000 Å	\$ 30,00	
Å addizionali	\$ 0,015	
Passo di processo	Costo per lotto	Costo totale
Costo set-up		\$ 150,00
Evaporazione	\$ 315,00	\$ 315,00
Totale		\$ 465,00



Stima dei costi

Tabella dei costi per la quarta litografia

Passo di processo	Per wafer	Per lotto	Totale
Maschera “Soda Lime”			\$ 450,00
Applicazione resist AZ4620	\$ 5,00		\$ 125,00
Esp. “1x Contact Aligner”	\$ 7,00		\$ 175,00
Sviluppo “AZ”		\$ 20,00	\$ 20,00
Soft baking		\$ 25,00	\$ 25,00
Standard RIE	\$ 25,00		\$ 625,00
Stripping resist organico		\$ 50,00	\$ 50,00
Pulizia “Piranha”		\$ 50,00	\$ 50,00
Totale			\$ 1520,00

Tabella dei costi per l'underetching del rame

Passo di processo	Per wafer	Per lotto	Totale
Attacco bagnato al rame		\$ 25,00	\$ 25,00
Pulizia “Piranha”		\$ 50,00	\$ 50,00
Totale			\$ 75,00

Tabella dei costi per il dicing

Passo di processo	Per taglio	Per lotto	Totale
Costi set-up			\$ 50,00
Costi per wafer		\$ 35,00	\$ 875,00
Dicing	\$ 0,30	\$ 69,30	\$ 1732,50
Totale			\$ 2657,50



Costi totali

Quantità da produrre		
Wafer	25	
Comp/wafer	9640	
Totale componenti	241000	
Passo di processo	Costo per wafer	Costo totale
Wafer di vetro	\$ 15,00	\$ 375,00
Evaporazione oro		\$ 510,00
Prima litografia		\$ 930,00
Evaporazione rame		\$ 270,00
Seconda litografia		\$ 920,00
Seconda evaporazione rame		\$ 375,00
Terza litografia		\$ 920,00
Evaporazione permalloy		\$ 465,00
Quarta litografia		\$ 1520,00
Underetching rame		\$75,00
Passivazione		\$ 0,00
Dicing		\$ 2680,00
Packaging	\$ 915,80	\$ 22895,00
Totale		\$ 31935,00
Per wafer		\$ 1277,40
Per componente		\$ 0,13



Rendering 3D del dispositivo

