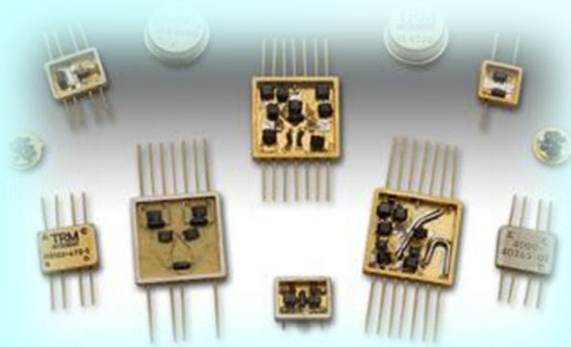


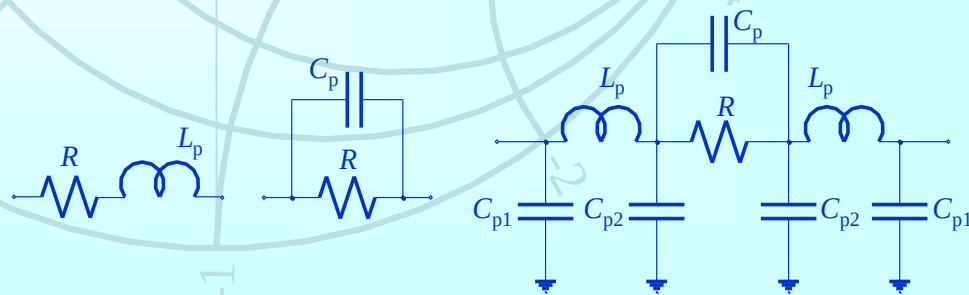
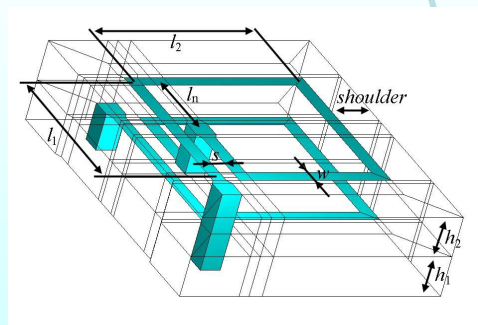
Микроталасна пасивна кола



Милка Потребић
Дејан Тошић



Концентрисане пасивне компоненте



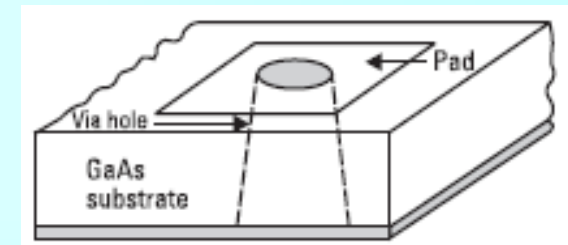
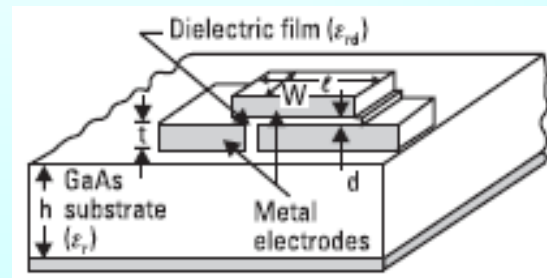
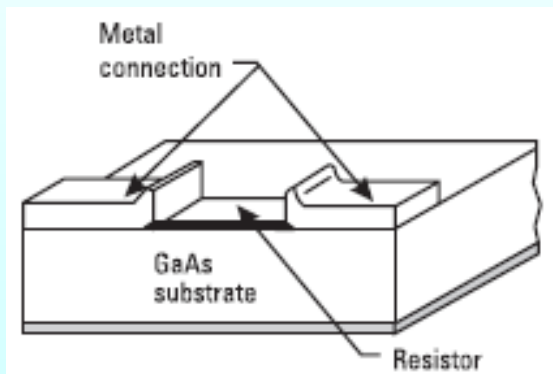
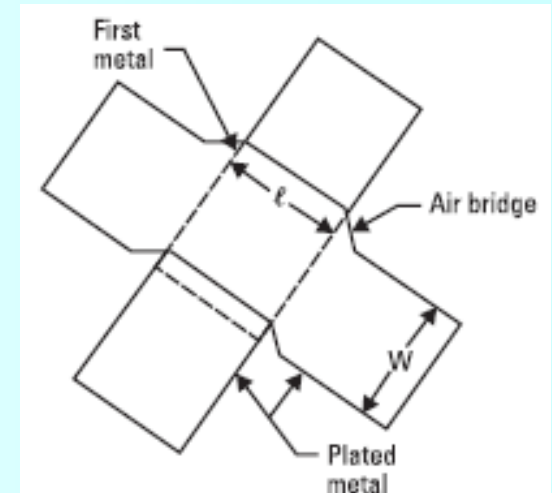
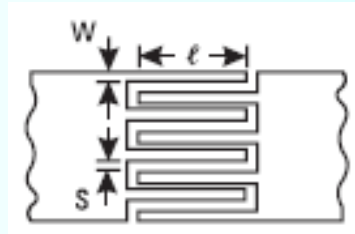
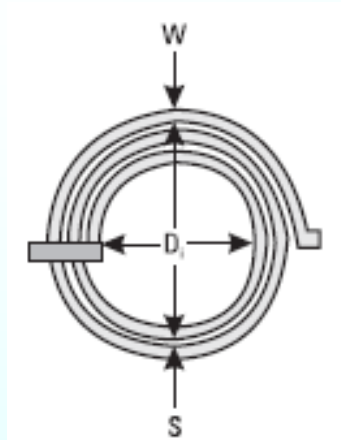


Концентрисане пасивне компоненте

- Концентрисане пасивне компоненте =
= елементи / компоненте са концентрисаним параметрима
= дискретни елементи / дискретне компоненте
- Димензије $\ll \lambda_g$ ($< \lambda_g/20$)
- Смањење димензија микроталасних (МТ) интегрисаних кола (МИС), јефтинија кола
- Монолитна МТ интегрисана кола (ММИС)
- Керамичка вишеслојна кола (LTCC)
(Low Temperature Co-fired Ceramic)



У ММІС колима

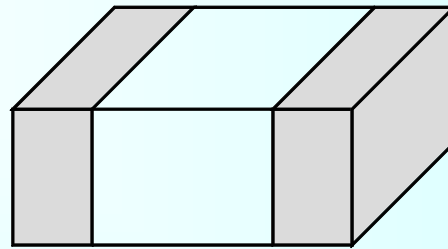
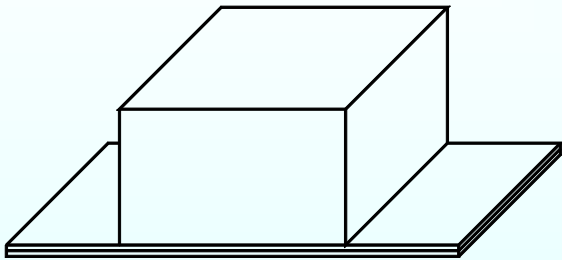


Спирални калем, интердигитални кондензатор, ваздушни мост, танкослојни отпорник, МІМ кондензатор, вија

Праве се на истој полупроводничкој подлози као транзистори и диоде



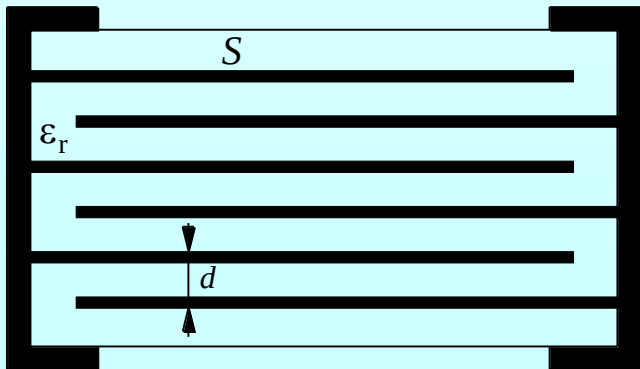
SMD компоненте (чипови)



Паковања SMD отпорника и кондензатора



SMD кондензатори и
кондензатори са ножицама



Пресек чипа SMD кондензатора
са више плоча



Предности и мане

(у односу на водне и таласоводне компоненте)

Предности:

- мања величина
- нижа цена
- већи односи трансформације импедансе
- мање међусобне спреге
- већи радни фреквенцијски опсези

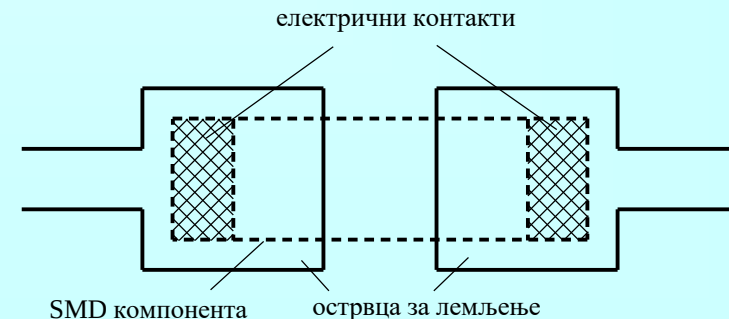
Мане:

- мањи Q -фактори
- мања могућност контроле и финог подешавања
- паразитни ефекти



Технологија израде SMD компоненти

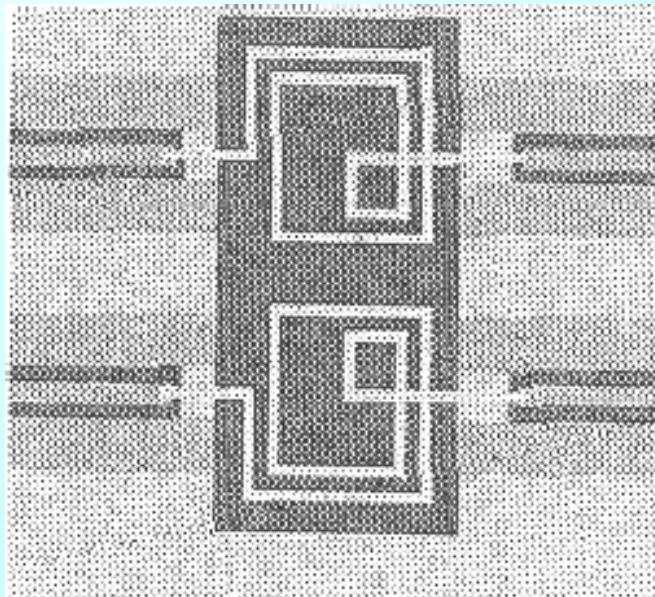
- SMT (Surface-Mount Technology), SMD (Surface-Mounted Devices) компоненте праве се у паковањима (чиповима)
- Причвршћивање лемљењем, микрозавари-вањем, термокомпресијом, ултразвучним заваривањем, проводним лепковима
- Добијају се хибридна интегрисана МТ кола (Али тако се праве и класична штампана кола)
- Стопице за аутоматско лемљење





SMD компоненте

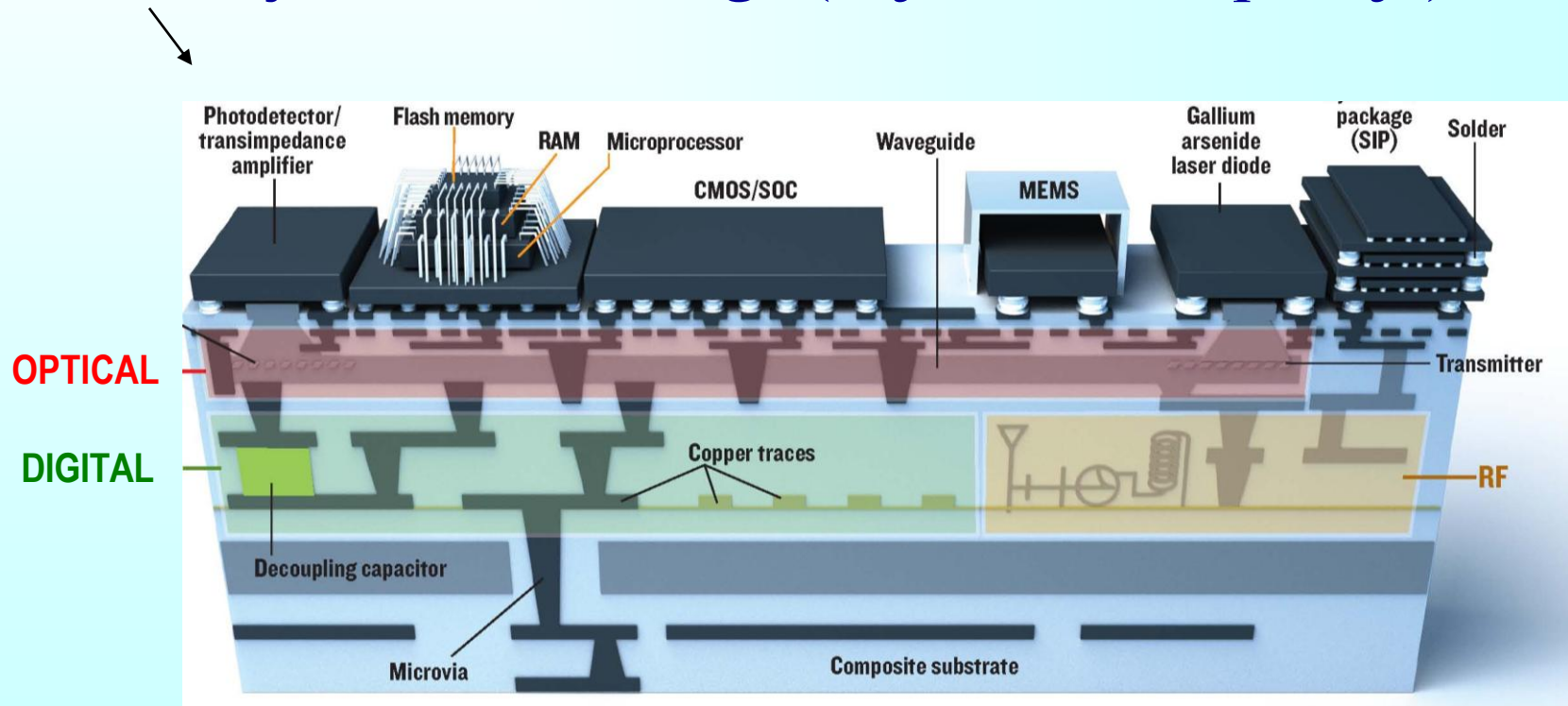
- Праве се у стандардним величинама (mm, mil)
- У штампаној технологији фотолитографски поступак на једно- или вишеслојној диелектричној подлози (нпр. штампани калемови)





Још већа интеграција (SIP, SOP)

- SIP = System In Package
- SOP = System On Package (највећа интеграција)





- ## Калем Coilcraft (MWO)

Microstrip Via 1

Model: analytical

Specific: analytical

Rvia [mm]: EM

Diagram: A rectangular microstrip via with length L , width W , and radius $R_{via}/2$.



Које компоненте ћемо обрадити

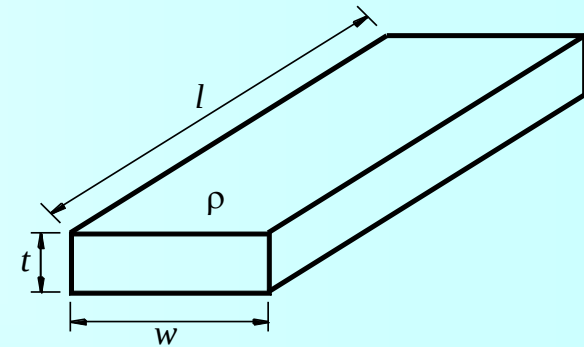
- Отпорници
- Калемови
- Кондензатори
- Трансформатори
- Прекидачи
- Вије и мостови
- MEMS компоненте
(MEMS = MicroElectroMechanical Systems)



Отпорници

- Слојеви (филмови) отпорног материјала
- Паралелепипеди мале висине
- Технологије танких и дебелих филмова
- Код ММІС: полупроводник окружен диелектриком

$$R = \rho l / S = \rho l / (t w) \quad R = R_{sq} \frac{l}{w}$$



- карактеристика отпорног филма
- скин-ефекат код отпорника није изражен
- У микроталасним колима

$$R = 10 \text{ m}\Omega - 10 \text{ M}\Omega$$



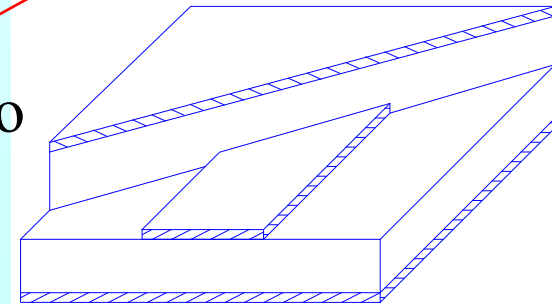
Отпорници: *остали параметри*

- Остали параметри: максимална снага, температурни коефицијент, толеранција, максимална струја, максимални напон, максимална фреквенција и стабилност
- Johnson-ов шум (термални, "бели")

$$U_{\text{ш}} = \sqrt{4kRT\Delta f}$$

ρ у односу на злато

SSUBL
Er1=3.38
Er2=3.38
Tand1=0
Tand2=0
H1=1 mm
H2=1 mm
T=0.05 mm
Rho=3
Name=SSUBL1

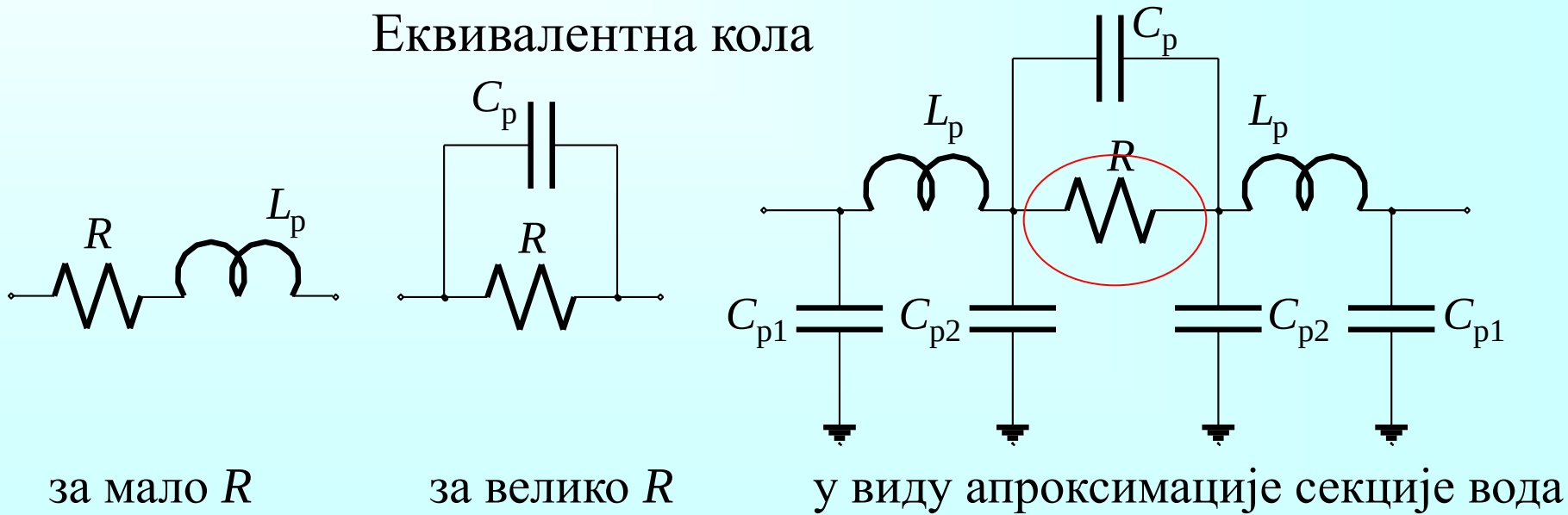




Отпорници

паразитни ефекти и еквивалентна кола

Паразитна отпорност, капацитивност и индуктивност

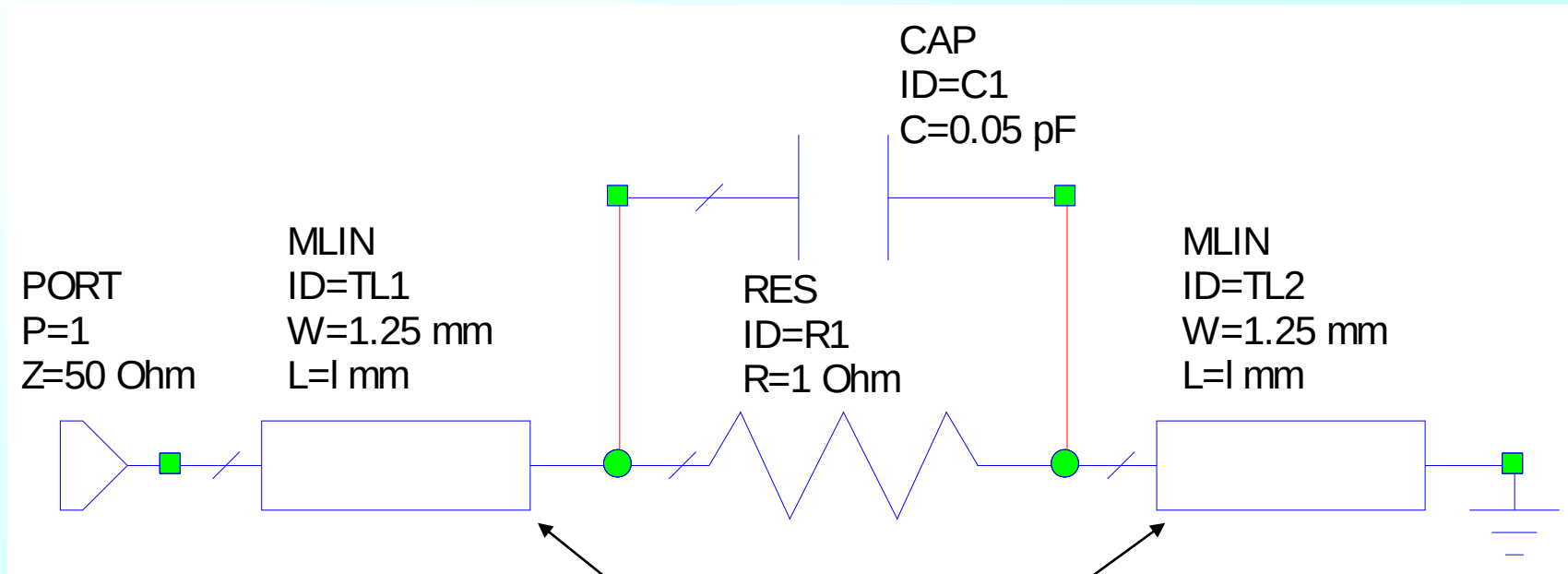


Овако се могу моделовати и друге реалне компоненте!



Отпорници

еквивалентно коло са секцијама водова

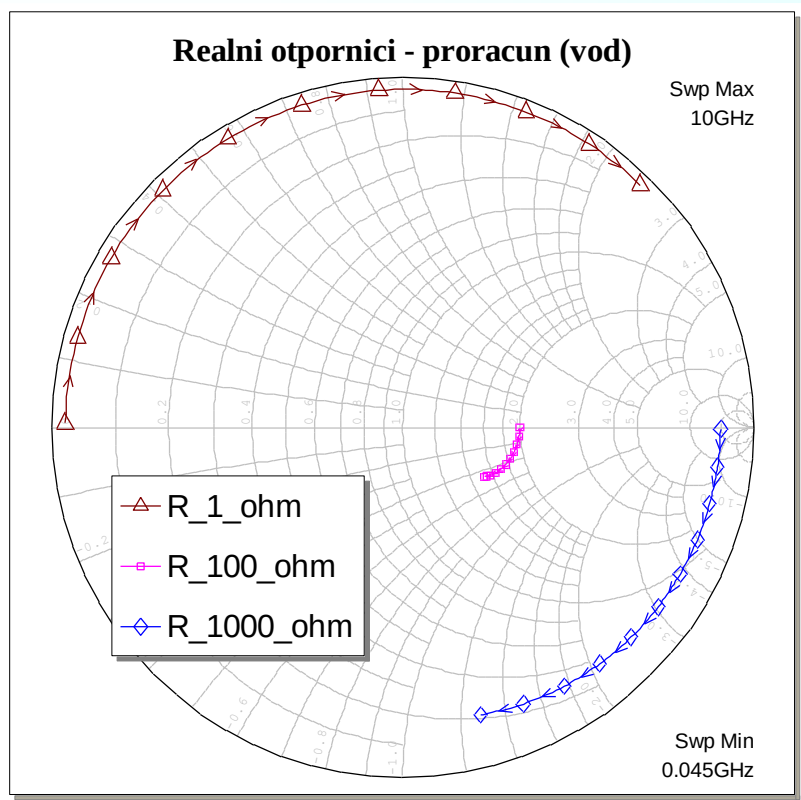


секције
водова

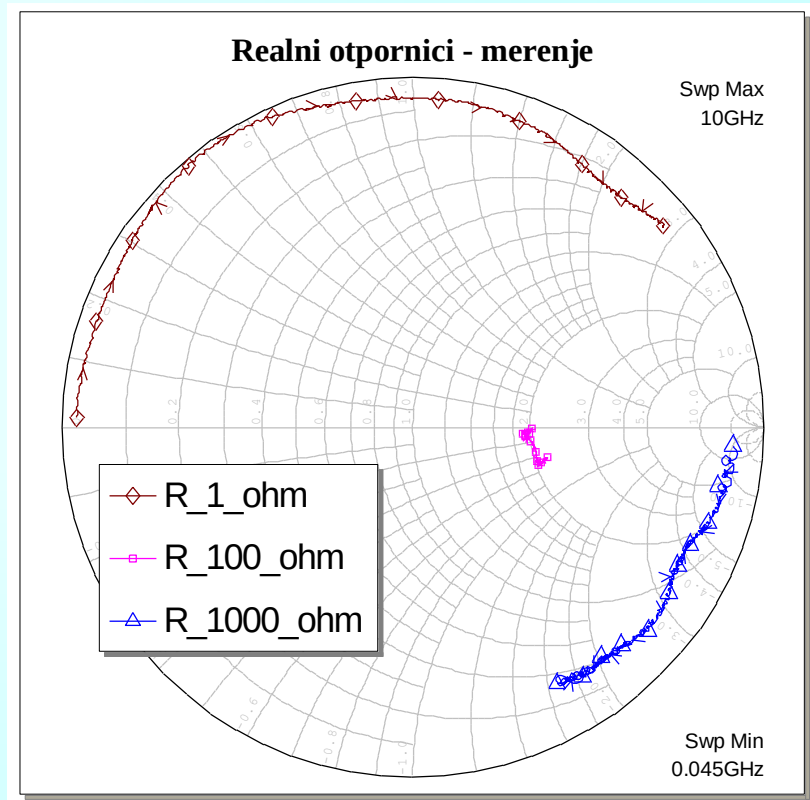
и за мало и за велико R

Овако се могу моделовати и друге реалне компоненте!

Отпорници: Смитов дијаграм



Прорачун



Мерење

$$R = 1; 100; 1000 \, \Omega, \quad f = 45 \, \text{MHz} - 10 \, \text{GHz}, \quad (Z_0 = 50 \, \Omega)$$



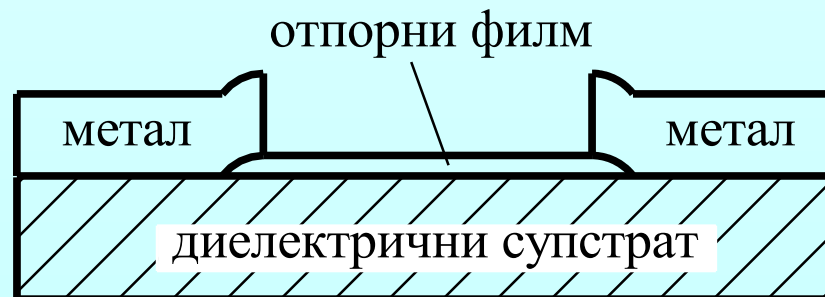
Отпорници: *врсте отпорника*

SMD:

- Танки филмови: NiCr, TaN, фотолитографски
(0,05 - 0,2 μm , 5 - 250 $\Omega/\text{kvadrat}$)
- Дебели филмови: C, RuO₂, пасте, 850° C
(20 $\Omega/\text{kvadrat}$ – 500 k $\Omega/\text{kvadrat}$)

Монолитни:

- Танки филмови, фотолитографски, слични SMD





Калемови

- Индуктивност $L = \frac{\Phi}{i}$? $L = \frac{2W_L}{i^2}$

$$u_L = L di / dt \quad Z_L = j\omega L$$

$$L = 1 - 10 (100) \text{ nH}$$

- Унутрашња индуктивност се занемарује.
- Мерење индуктивности:
 - преко s-параметара,
 - мерењем импедансе или
 - резонантним методама

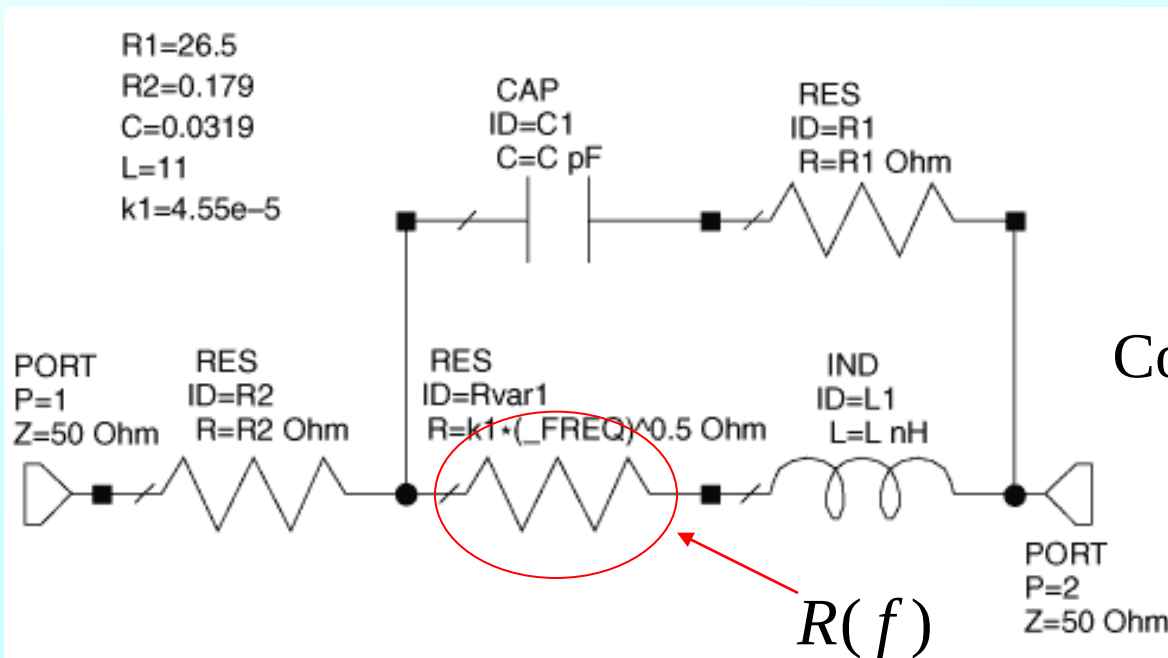
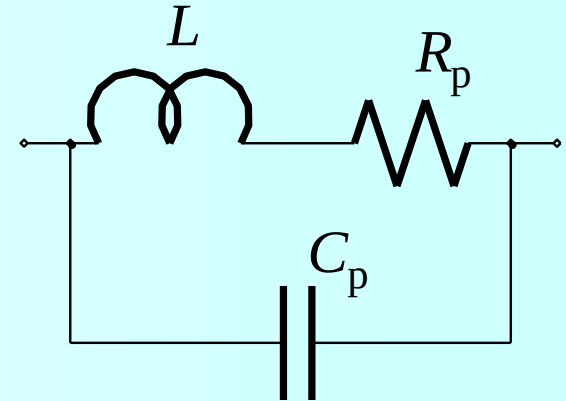
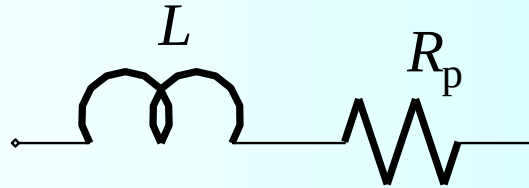
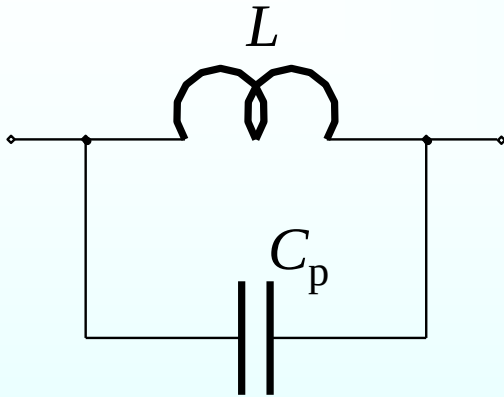


Калемови: *паразитни ефекти*

- Паразитна капацитивност и отпорност
- Последице: антирезонанција калема и смањен Q -фактор
- Резонанција калема због електричне дужине проводника која више није мала
- (Промена индуктивности са учестаношћу, губици у магнетском језгру и диелектрику)



Калемови: еквивалентна кола

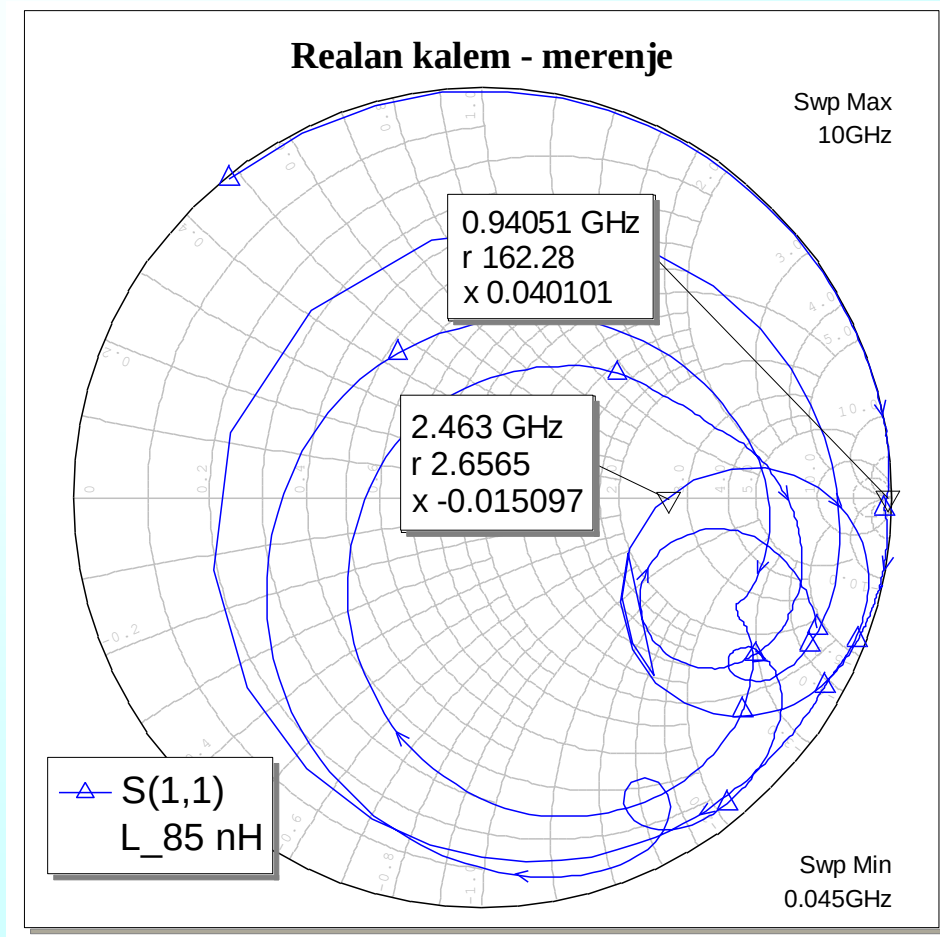


Coilcraft (MWO)

Калемови: Смитов дијаграм



Мерење



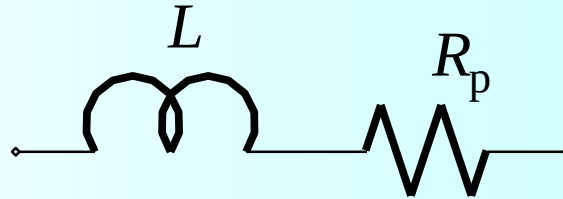
$$L = 85 \text{ nH}, \quad f = 45 \text{ MHz} - 10 \text{ GHz}, \quad (Z_0 = 50 \Omega),$$

$$f_a = 965 \text{ MHz}, \quad f_r \approx 2,4 \text{ GHz} \quad (\text{као вод дужине } l/2)$$

Калемови: *Q*-фактор и остали ефекти



$$Q = \frac{X_L}{R_L} = \frac{\omega L}{R_p}$$



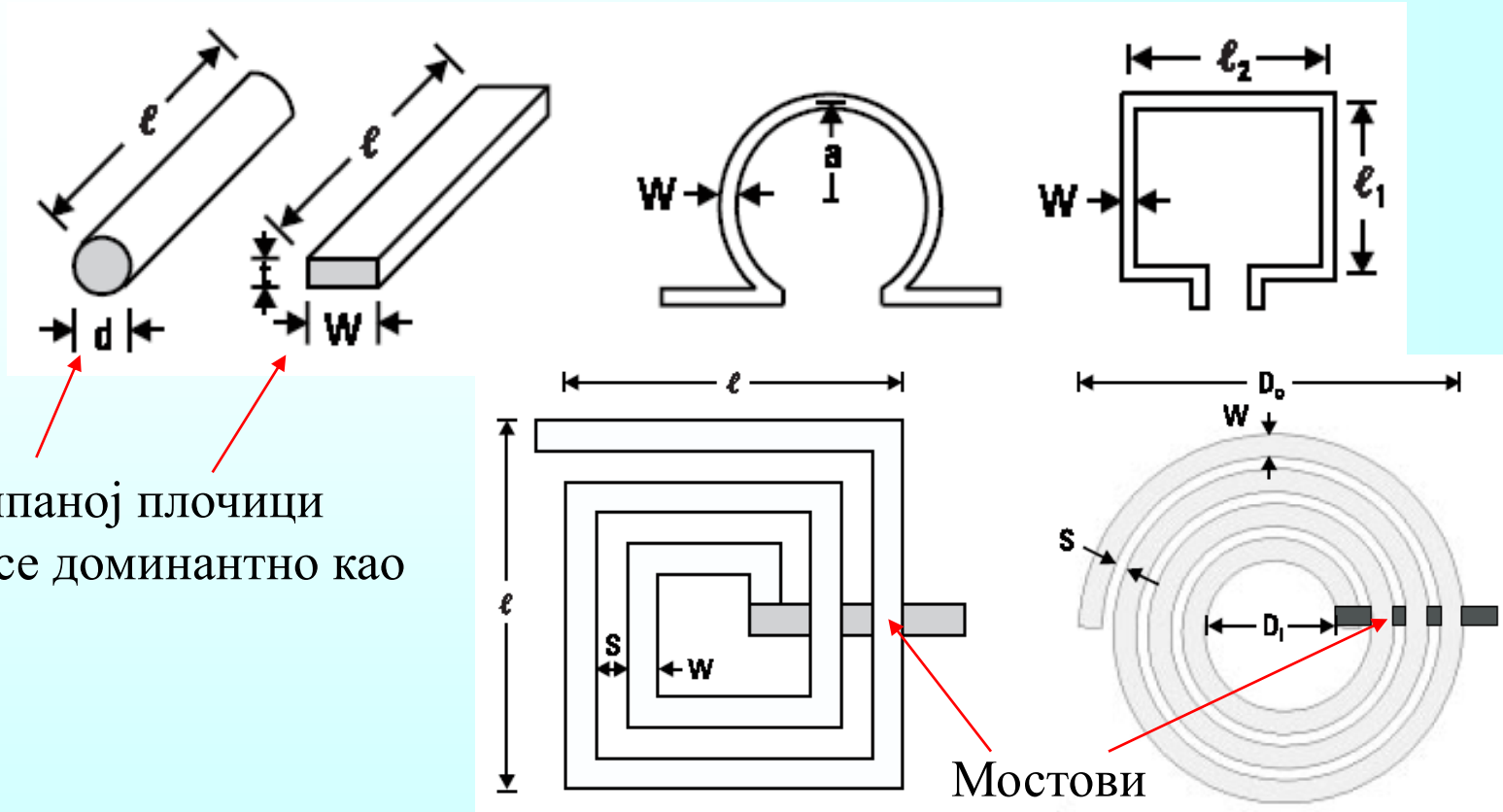
- Промена са учестаношћу:

$$Q_2 = Q_1 \frac{f_2}{f_1} \quad \text{или} \quad Q_2 = Q_1 \sqrt{\frac{f_2}{f_1}} (?)$$

- Остали параметри: максимална дозвољена струја, максимална дозвољена (активна) снага, радни температурни опсег, температурни коефицијент индуктивности и струја zasiћења



Калемови: *штампани калемови*



На штапаној плочици
понаша се доминантно као
калем!

Мостови

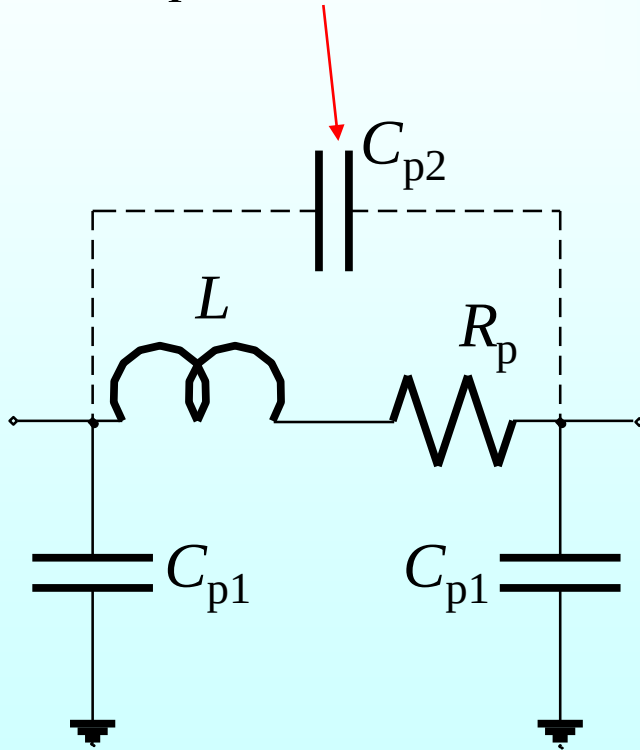
Једнослојни микротракасти штампани калемови:
секција проводне траке, кружна и правоугаона једнострука
петља, правоугаона и кружна спирала.



Калемови:

еквивалентно коло (са два приступа) штампаних калемова и приближне формуле

За спиралне калемове



Проводна трака:

Фактор проводне равни

$$L[\text{nH}] = 2 \cdot 10^{-4} l \left[\ln \frac{l}{w+t} + 1,193 + \frac{w+t}{3l} \right] K_g$$

$$C_{p1}[\text{pF}] = 16,67 \cdot 10^{-4} l \frac{\sqrt{\epsilon_{re}}}{Z_c}$$

$$R_p = \frac{K R_{sq} l}{2(w+t)}$$

Кружна спирала:

$$L[\text{nH}] = 3,937 \cdot 10^{-2} \frac{a^2 N^2}{8a + 11c} K_g$$

$$C_{p2}[\text{pF}] = 3,5 \cdot 10^{-5} D_o + 0,06 \quad R_p = \frac{K N R_{sq}}{w} \pi a$$



Калемови:

индуктивност разних штампаних спирала

$$L[\text{nH}] = \frac{\mu_0 N^2 D_{\text{sr}} c_1}{2} \left[\ln \frac{c_2}{\rho} + c_3 \rho + c_4 \rho^2 \right]$$

$\rho = (D_o - D_i) / (D_o + D_i)$ - фактор испуњености

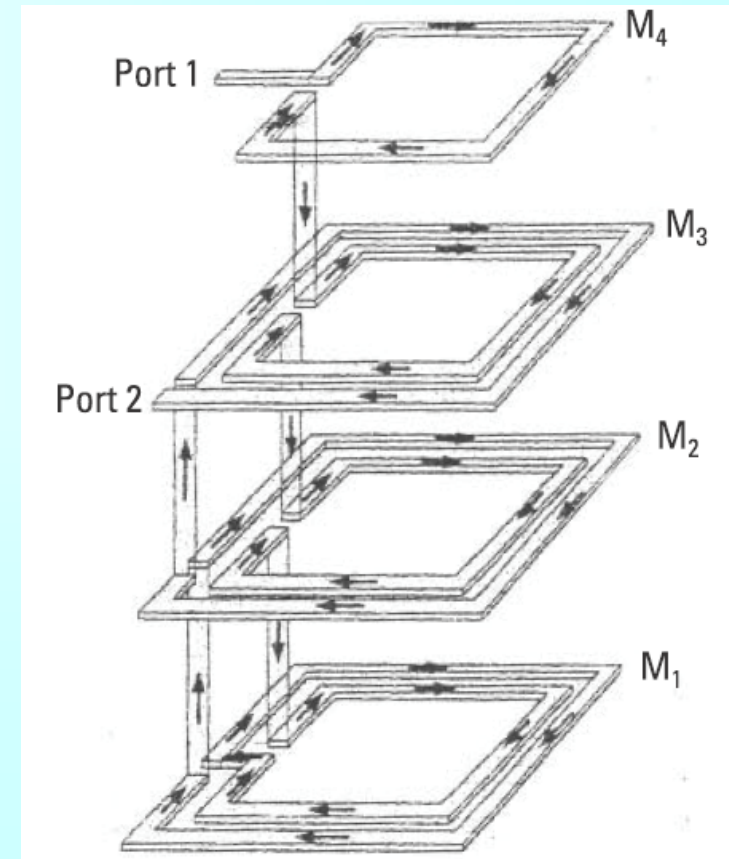
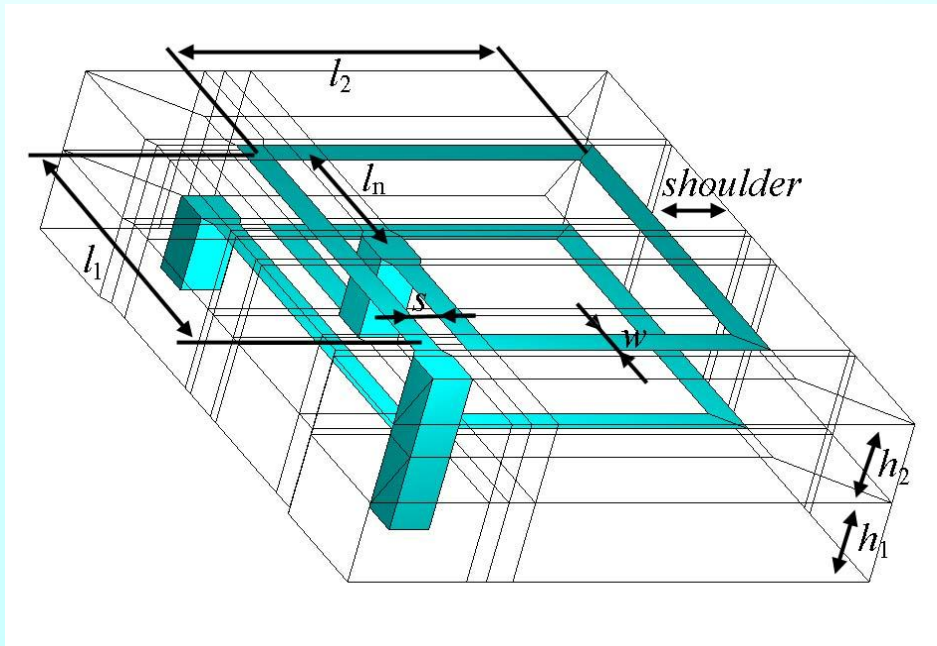
D_{sr} - средњи пречник спирале

Облик спирале	c_1	c_2	c_3	c_4
Круг	1,00	2,46	0,00	0,20
Квадрат	1,27	2,07	0,18	0,13
Шестоугао	1,09	2,23	0,00	0,17
Осмоугао	1,07	2,29	0,00	0,19



Калемови: *штампани, вишесратни*

- На вишеслојном супстрату
- Повећање индуктивности
- Конфигурације са смањеном паразитном капацитивношћу





Калемови: *штампани калемови*

- У техници тракастих (stripline) водова
 - мање L и Q
 - већа ЕМ изолација

• димензије	L	Q	f_a
$\sim 1\text{mm}$	1 - 10 nH	10 - 100	1–10 GHz
$\sim 0,1\text{mm}$	$\sim 1\text{nH}$	~ 10	$\geq 50\text{ GHz}$

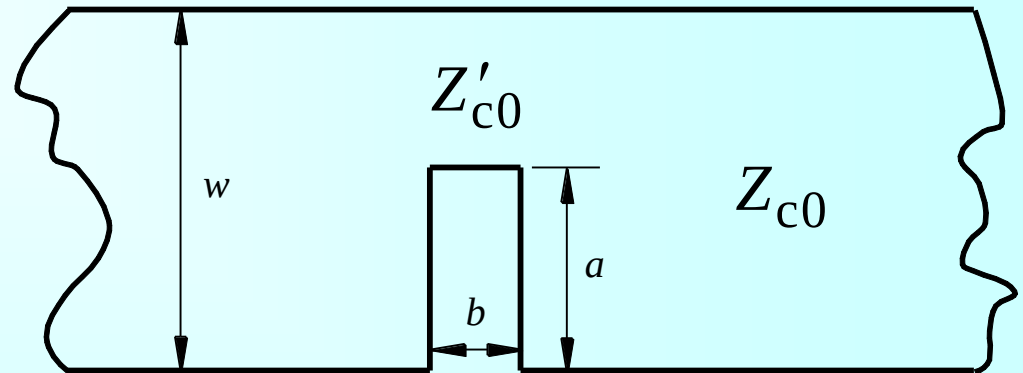


Реализације калемова

- Кратко *сужење микротракастог вода* се понаша као концентрисани калем

$$L = \frac{\mu_0 \pi h}{2} \left(1 - \frac{Z_{c0}}{Z'_{c0}} \right)^2$$

$$b < h$$



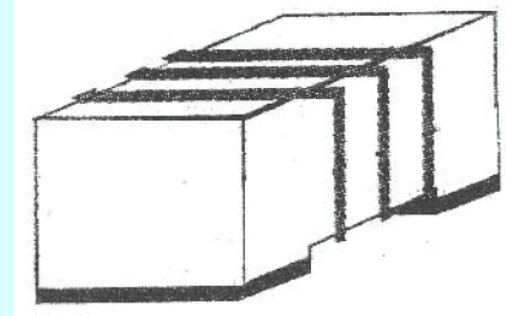
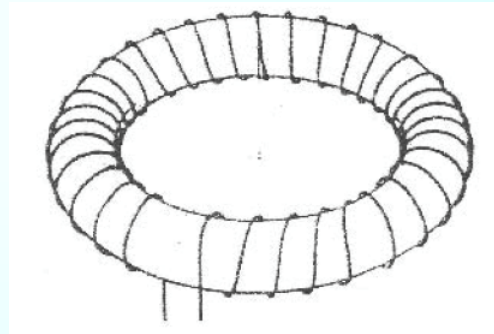
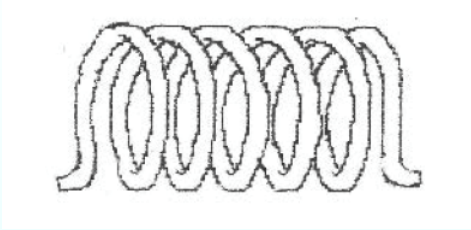
- Кратко спојени* (кратки) *вод* (огранак вода)

$$L = L'D$$

$$Z_L \ll Z_c$$



Калемови: *жичани*



- За веће индуктивности (реда 100 nH)
- Нижа антирезонантна учестаност (око 1 GHz)
- Познати су разни аналитички изрази за калем

Аналитички изрази за калем



Кружни завојак

$$L = \mu_0 (2r - a) \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k) - E(k) \right] \quad k = \frac{2\sqrt{r(r-a)}}{2r-a} \quad K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\phi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \phi}}, \quad E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \phi} d\phi$$

Танка жица

$$L \approx \mu_0 r \left[\ln \left(\frac{8r}{a} \right) - 2 \right]$$

Калем са N навојака

$$L \approx \mu_0 N^2 r \left[\ln \left(\frac{8r}{a} \right) - 2 \right]$$

Дугачак соленоид

$$L = \mu_0 \frac{\pi r^2 N^2}{l}$$

Соленоид није дугачак

$$L[\text{nH}] = \frac{4\mu_r (\pi r N)^2}{l + 0,9r}$$

$$L[\text{nH}] = \begin{cases} \mu_0 \frac{\pi r^2 N^2}{l} \left[f_1 \left(\frac{4r^2}{l^2} \right) - \frac{8r}{3\pi l} \right] & (l \geq 2r) \\ \mu_0 r N^2 \left\{ \left[\ln \left(\frac{8r}{l} \right) - 0,5 \right] f_1 \left(\frac{l^2}{4r^2} \right) + f_2 \left(\frac{l^2}{4r^2} \right) \right\} & (l < 2r), \end{cases}$$

$$f_1(x) = \frac{1,0 + 0,383901x + 0,017108x^2}{1,0 + 0,258952x}$$

$$f_2(x) = 0,093842x + 0,002029x^2 - 0,000801x^3$$

Густо мотан торусни намотај

$$L = \mu \frac{SN^2}{l}$$

Дебео правоугаони торус

$$L = \mu \frac{hN^2}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

Дебео кружни торус

$$L = \mu_0 N^2 \left(r - \sqrt{r^2 - a^2} \right)$$



Калемови:

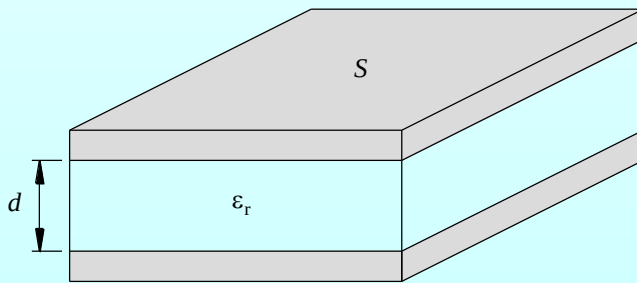
промена индуктивности и феритна језгра

- Код соленоида – размицање завојака ($L \downarrow$)
- Уметање магнетског материјала ($L \uparrow$)
- Уметање проводног материјала ($L \downarrow$)
- Феримагнетски материјали (ферити)
- Прах – моделовање – синтеровање на 1200°
- Керамички материјали, $\mu_r \approx 10$

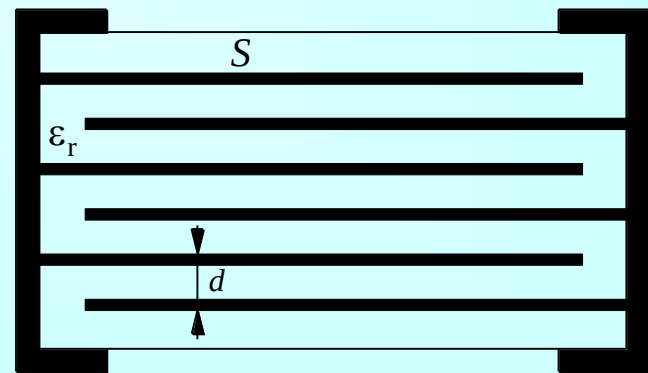


Кондензатори

- Капацитивност: $C = \frac{Q}{U}$ $Q_1 = -Q_2$ (симетричан режим)
- У микроталасним колима $C = 0,1 - 100 \text{ pF}$
- Код SMD најчешћи су плочасти кондензатори:



$n = 2$



$n = 6$



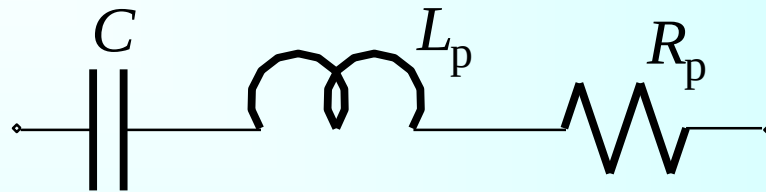
Кондензатори: *остали параметри*

- Пробојни напон, максимални напон, Q -фактор, резонантна учестаност (од интереса је само прва), максимална струја, толеранција и температурни коефицијент.
- $U_{\max} = 50 - 500 \text{ V (SMD)}$, $U_{\max} < 100 \text{ V (монолитни)}$



Кондензатори: *паразитни ефекти*

- Основно еквивалентно коло кондензатора:



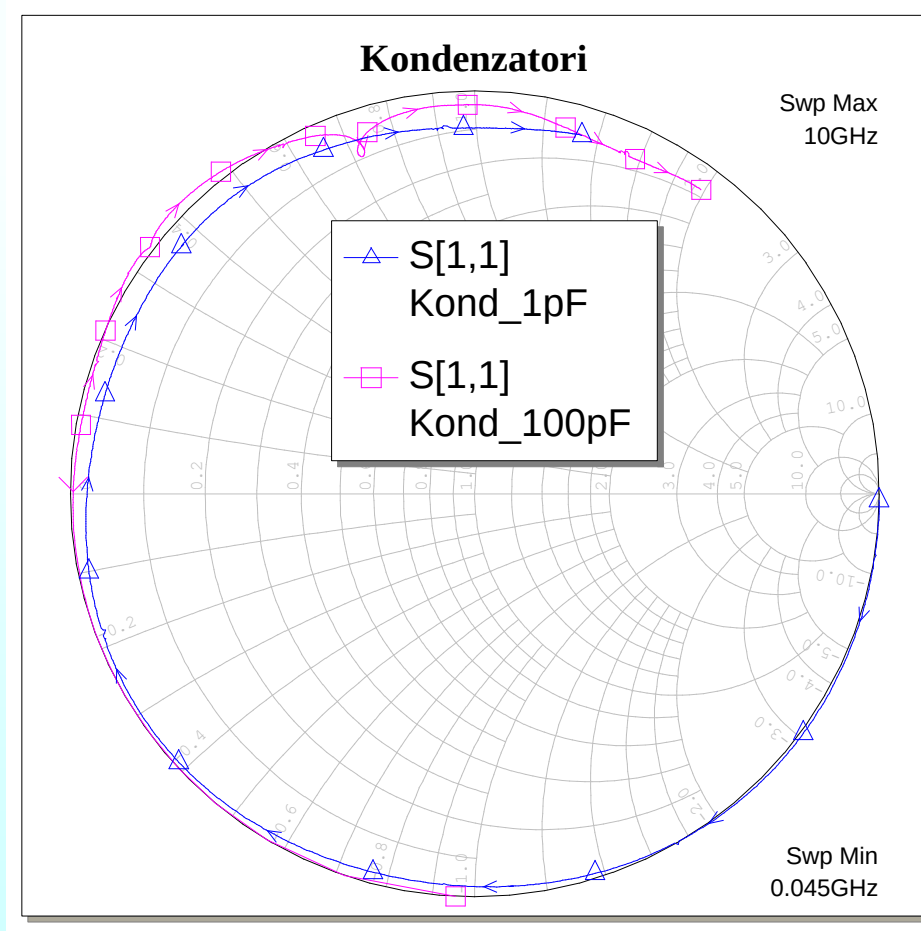
- R_p моделује губитке у диелектрику и отпорност контаката
- L_p је последица величине кондензатора
- Резонантна учестаност (SRF):
 - за $f > f_0$ кондензатор постаје претежно индуктиван

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C}}$$

Кондензатори: Смитов дијаграм



Мерење

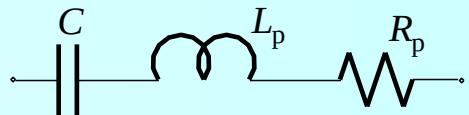


$$C = 1 \text{ pF}; 100 \text{ pF}, \quad f = 45 \text{ MHz} - 10 \text{ GHz}, \quad (Z_0 = 50 \, \Omega),$$

$$f_0 = 5,4 \text{ GHz}; 540 \text{ MHz}$$

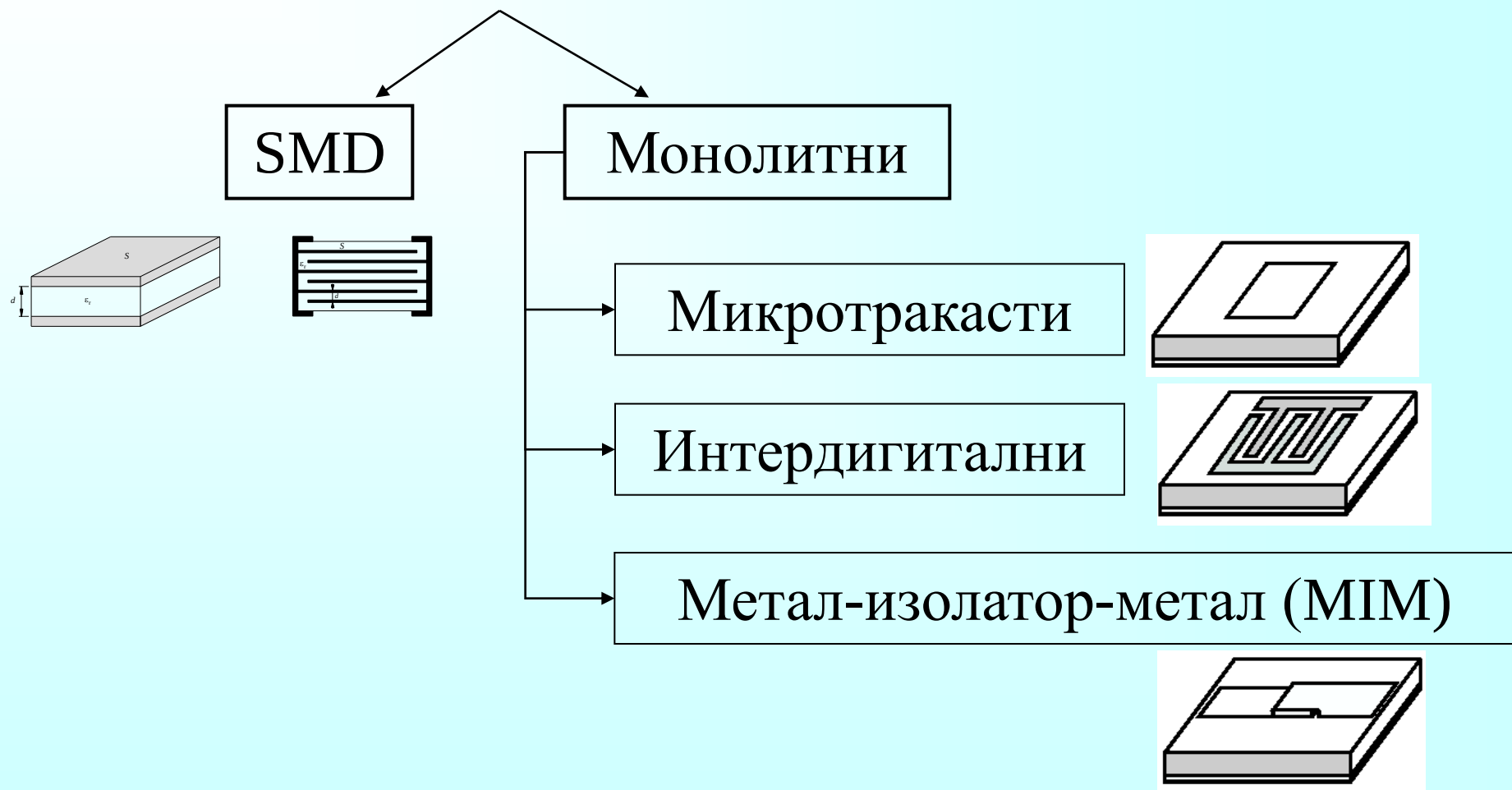


Кондензатори: губици и Q -фактор

- Преко R_p у еквивалентном колу 
- Преко Q -фактора
$$Q = \frac{|X_C|}{R_p} = \frac{1}{\omega C R_p}$$
- Фактор губитака (Dissipation Factor, DF)
$$DF = \frac{R_p}{|X_C|} = \omega C R_p = \frac{1}{Q}$$
- Ако се занемаре губици у прикључцима и контактима $DF = \operatorname{tg} \delta_{\text{dielektrika}}$



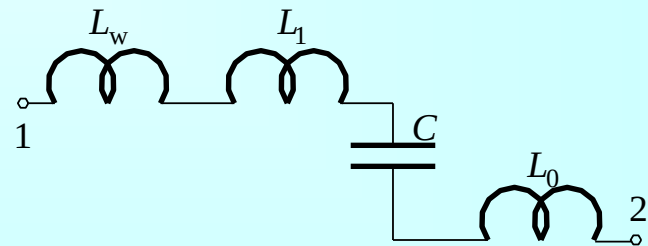
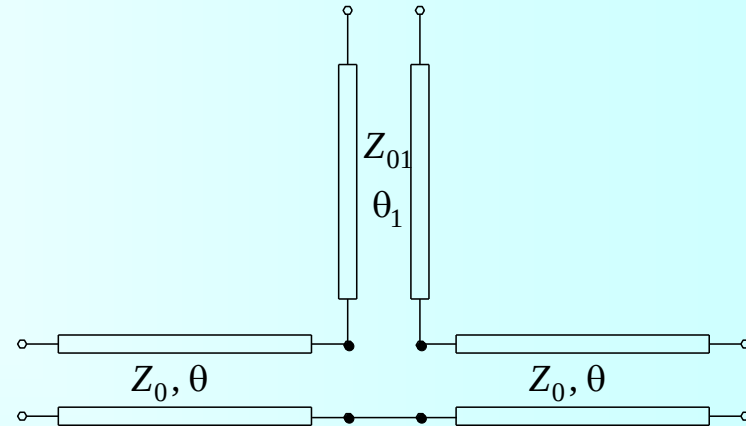
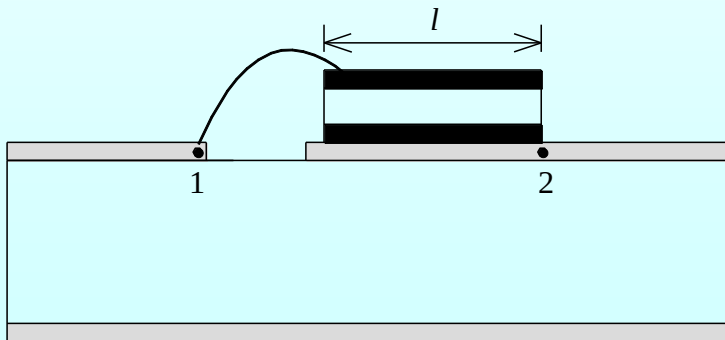
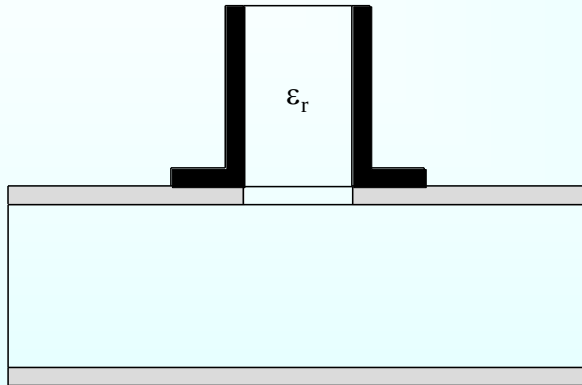
Кондензатори: *типови*





Кондензатори: SMD

- Редно везивање и еквивалентна кола



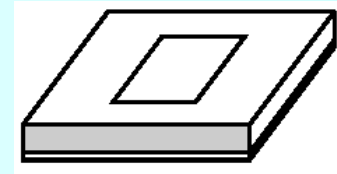
- Паралелно везивање захтева вије



Кондензатори:

монолитни микротракасти

- Кратка секција отвореног вода
- Мала капацитивност по јединици површине због дебелог супстрата



Пример. Одредити капацитивност по јединици површине микротракастог монолитног кондензатора на супстрату FR-4, дебљине 20 mil

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r S / h$$

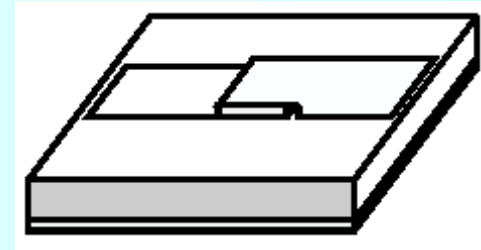
$$C_S = C / S = \varepsilon_0 \varepsilon_r / h \quad \varepsilon_r = 4,6 \quad h = 0,508 \text{ mm}$$

$$C_S = 0,08 \text{ pF} / \text{mm}^2$$

Кондензатори: *монолитни MIM*



- Диелектрик (Si_3N_4) дебљине $0,1 \mu\text{m}$
- Велика капацитивност по јединици површине због танког диелектрика



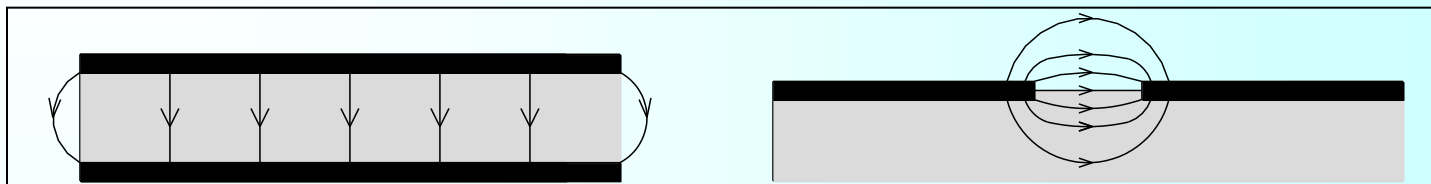
$$C_S = 300 \text{ pF/mm}^2$$

- $h = 0,02 \mu\text{m}$ $C_S = 1200 \text{ pF/mm}^2$
- Ta_2O_5 $\epsilon_r \approx 25$ $C_S = 1400 \text{ pF/mm}^2$
- Баријум-стронцијум-титанат:
 $\epsilon_r \approx 1000$ $C_S = 10000 \text{ pF/mm}^2$

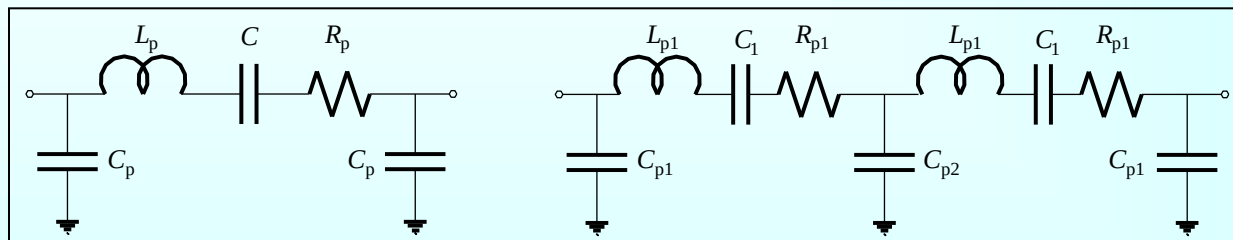
Проблем са фероелектрицима је температурна нестабилност

Кондензатори:

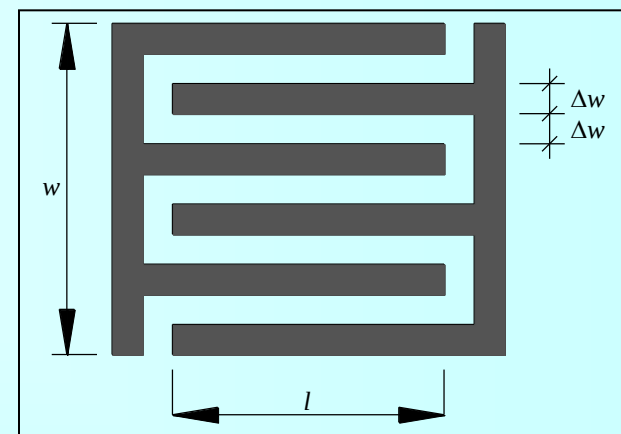
монолитни интердигитални



Линије поља плочастог и интердигиталног кондензатора



Еквивалентна кола интердигиталног кондензатора за
ниске и високе учестаности



$$l + w \ll \lambda$$

- Анализа декомпозицијом на
секције микротракастих водова



Кондензатори: *променљиви*

- Интердигитални кондензатор са фероелектриком – промена капацитивности помоћу једносмерног (DC) напона
- Варактор диоде. Капацитивност расте са повећањем DC напона инверзне поларизације



Трансформатори

- Трансформатор је пар спрегнутих калемова
- Савршен: $k = 1$ и без губитака
- Идеалан: савршен + $i_1 / i_2 = 1 / n$

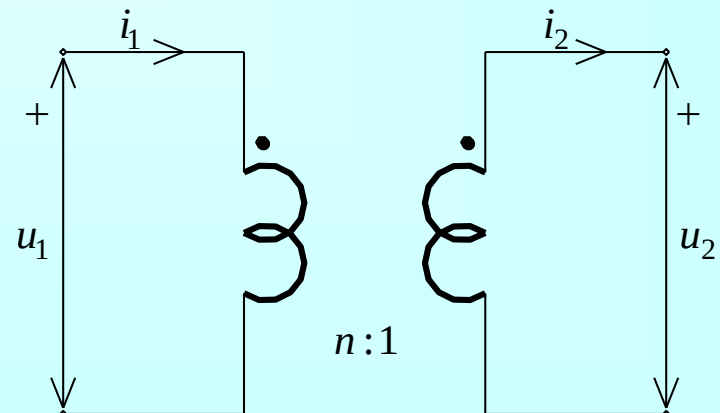
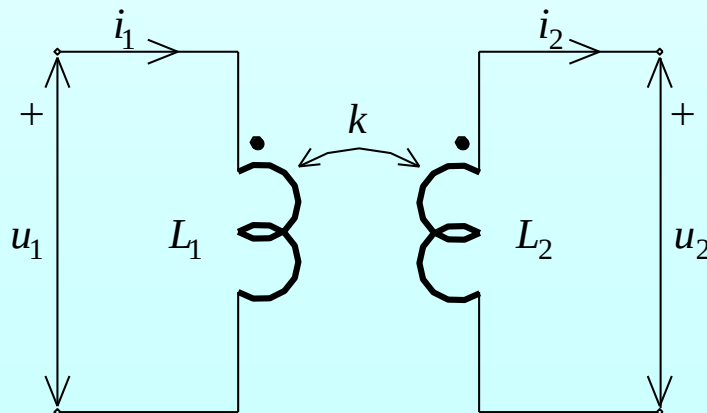
$$u_1 / u_2 = N_1 / N_2 = n$$

← преносни број

$$Z_{ul1} = Z_{p2} n^2$$

$$Z_{ul2} = Z_{p1} / n^2$$

Трансформатор импедансе



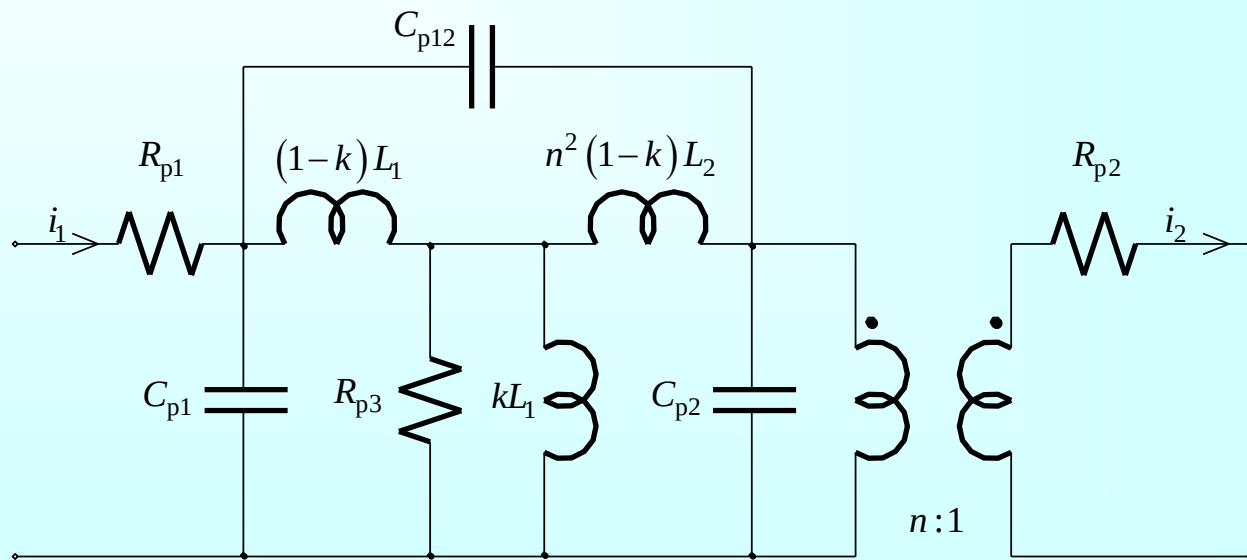
идеалан трансформатор (n)



Трансформатори:

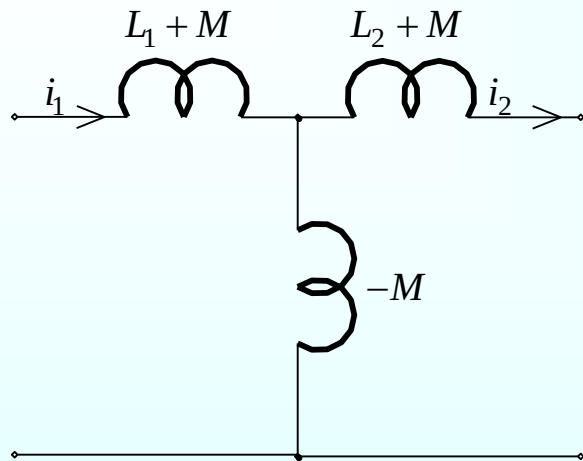
паразитни ефекти и еквивалентна кола

- Паразитни ефекти: губици, паразитна капацитивност, расипање флукса

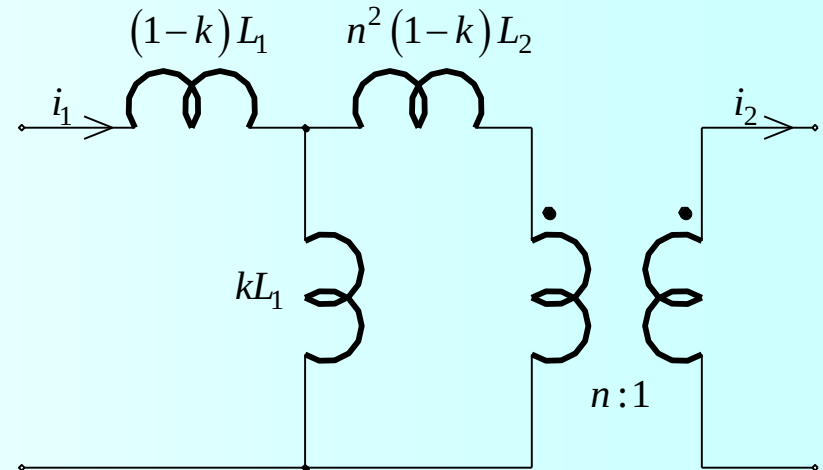


Еквивалентно коло реалног трансформатора

Трансформатори: еквивалентна кола

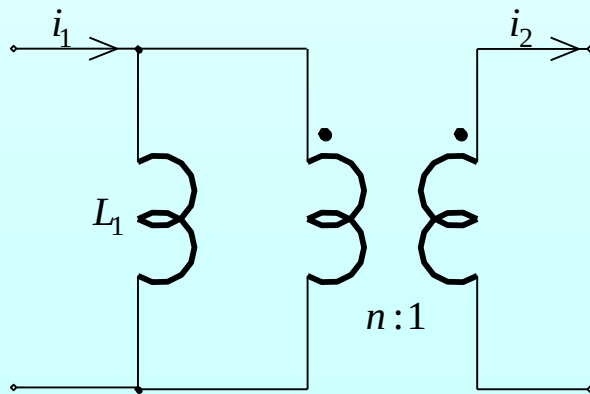


Т-мрежа

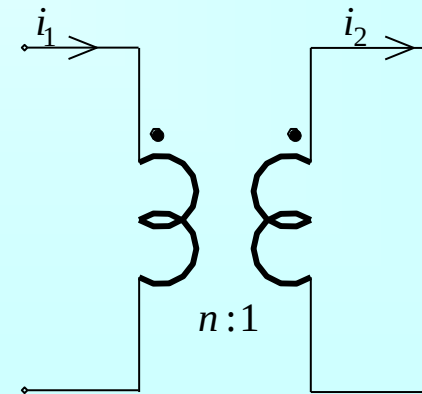


Генералисана Т-мрежа

за трансформатор без губитака



Савршен трансформатор



Идеалан трансформатор

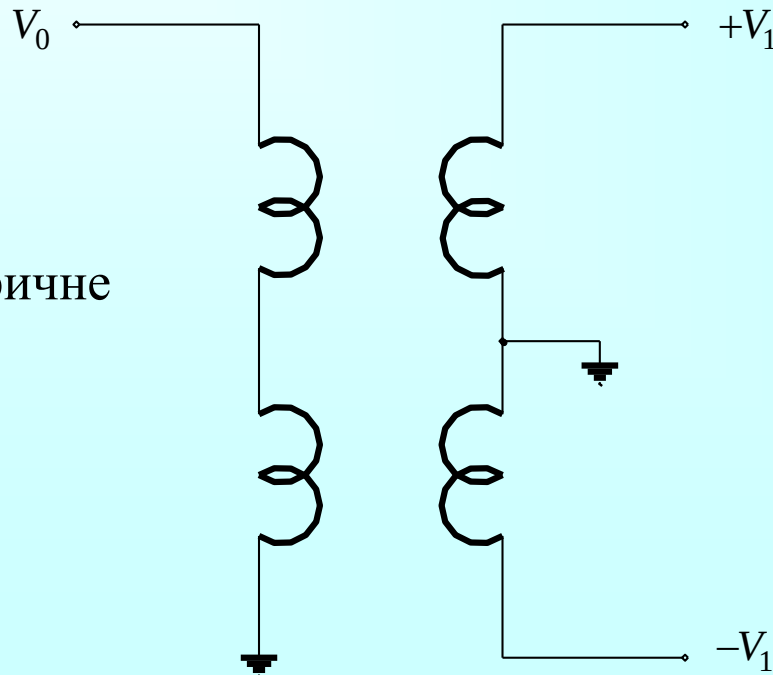


Трансформатори:

границе радне учестаности и балун у облику трансформатора

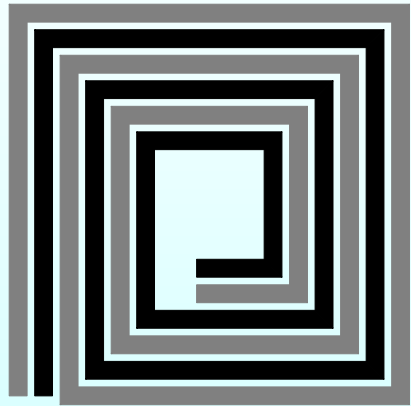
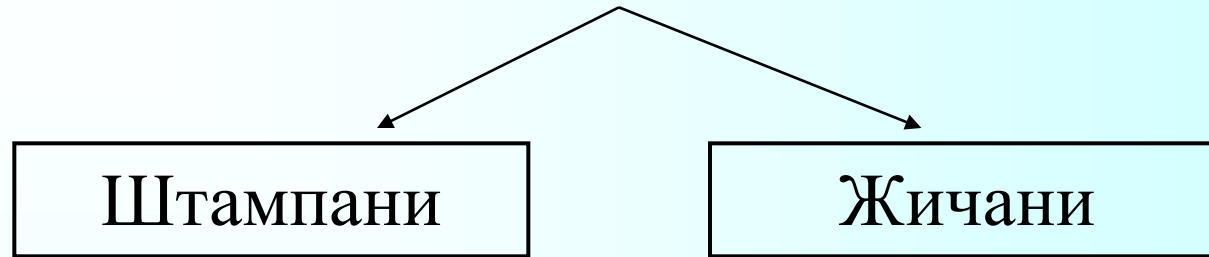
- За ваздушно језгро: због паразитних капацитивности $f < 4 \text{ GHz}$
- За магнетско језгро: због губитака $f < 2 \text{ GHz}$

Балун (прелаз са несиметричне на симетричну мрежу)

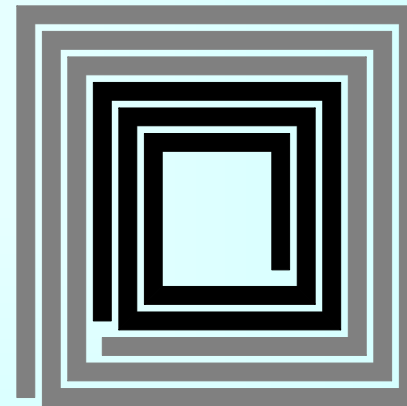
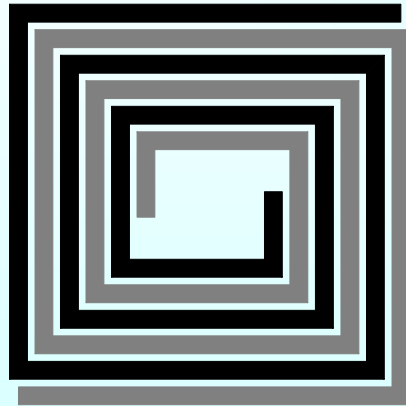




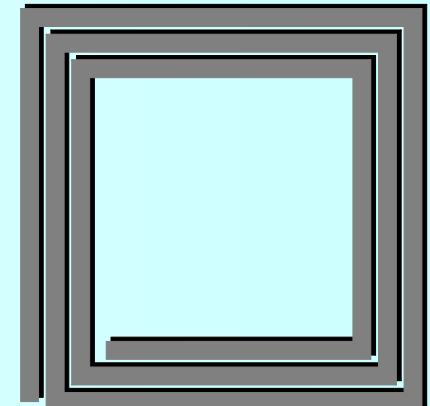
Трансформатори: *типови*



$k = 0,7 - 0,9$



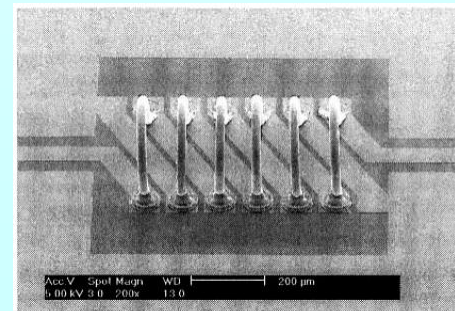
$k = 0,4 - 0,6$



$k = 0,8 - 0,95$

Штампано-жичани ММІС
трансформатор

9,4–14,1 GHz, $A < 1$ dB



0,7 mm

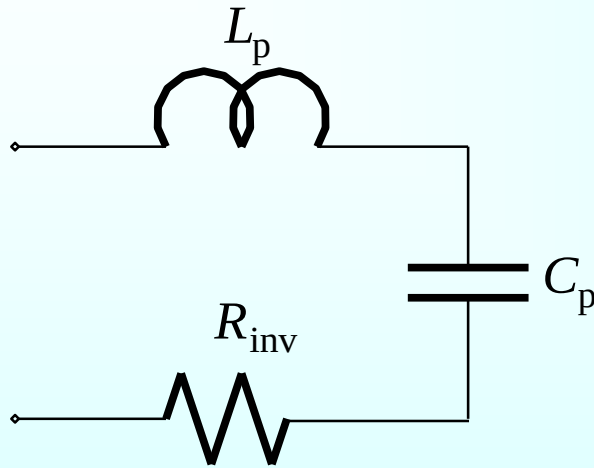


Прекидачи

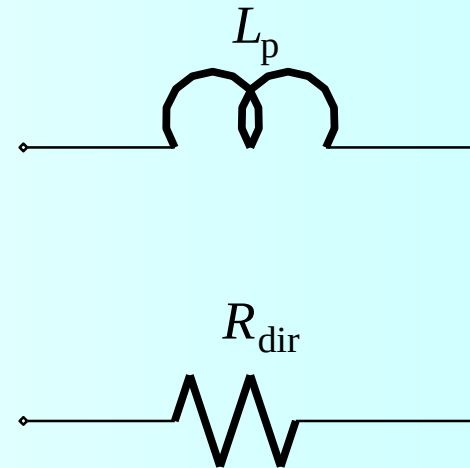
- За усмеравање тока снаге и сигнала
- **Механички** – таласоводни и коаксијални
 - издржавају велике снаге
 - гломазни и спори
- **Електронски** – PIN диоде (прекидање ~ 1 ns) и MESFET транзистори
 - брзи
 - за мање снаге
- **MEMS** прекидачи



Прекидачи: *прекидачка PIN диода*



Инверзно поларизована
(отворен прекидач)

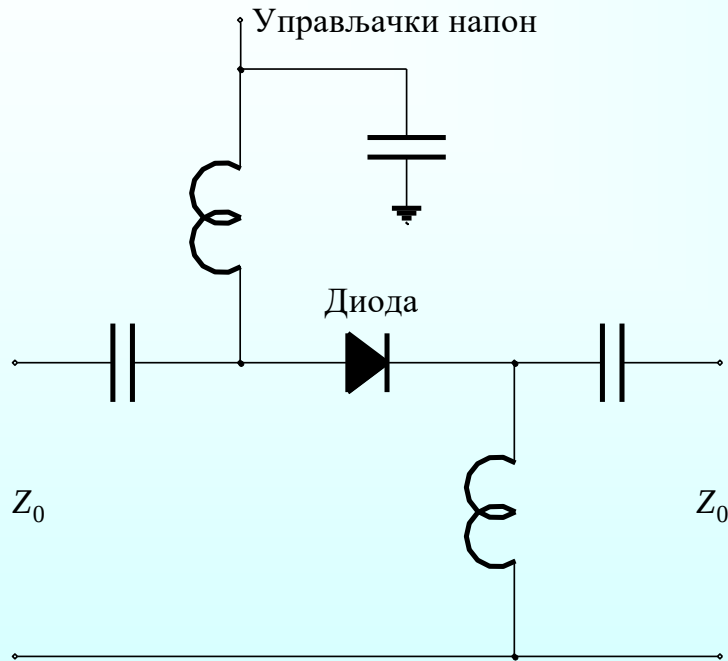


Директно поларизована
(затворен прекидач)

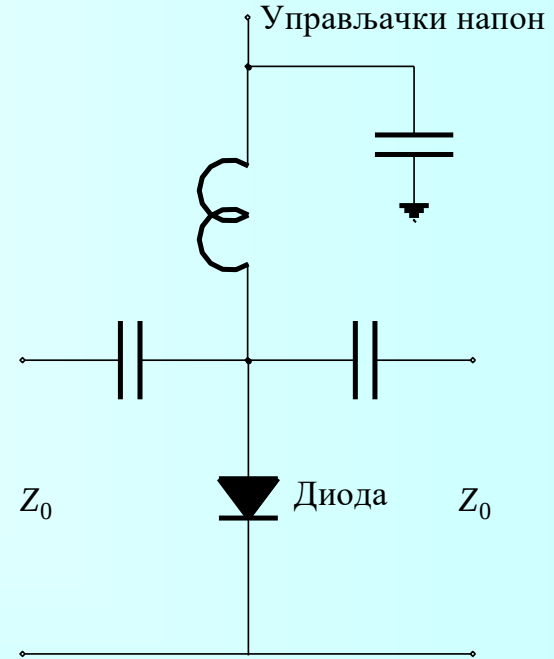


Прекидачи:

везивање прекидачке PIN диода у коло



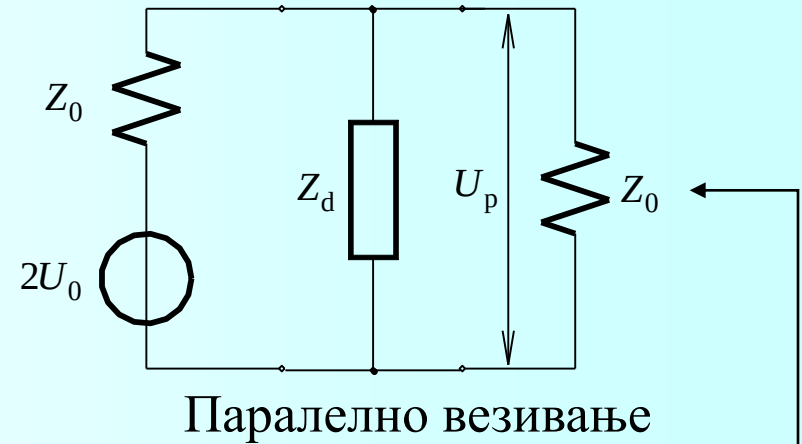
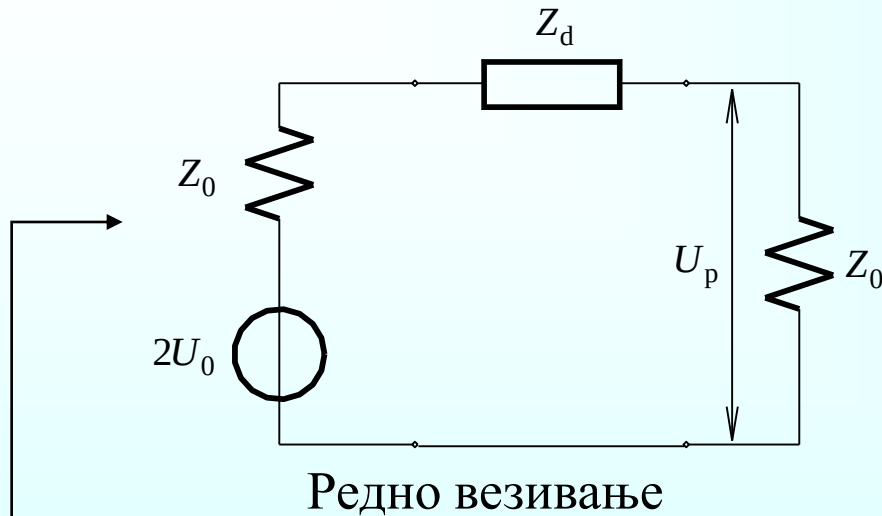
Редно везивање



Паралелно везивање

Прекидачи:

*унето слабљење при редном/паралелном везивању
прекидачке PIN диоде у колу*



$$A_{\text{ILredno}} = -20 \log |s_{21}| = -20 \log \left| \frac{U_p}{U_0} \right| = -20 \log \left| \frac{2Z_0}{2Z_0 + Z_d} \right|$$

$$A_{\text{ILparelno}} = -20 \log |s_{21}| = -20 \log \left| \frac{U_p}{U_0} \right| = -20 \log \left| \frac{2Z_d}{Z_0 + 2Z_d} \right|$$



Задатак

- $C_p = 0,1 \text{ pF}$ $L_p = 0,4 \text{ nH}$ $R_{\text{inv}} = 1 \Omega$ $R_{\text{dir}} = 0,5 \Omega$
 $f = 5 \text{ GHz}$ $Z_0 = 50 \Omega$
- Вод је са обе стране прилагођен ($Z_g = Z_p = Z_0$)
- Одредити:
 1. унето слабљење при отвореном и затвореном прекидачу за случај редне и паралелне везе, под претпоставком да је вод на обе стране прилагођен.
 2. однос унетог слабљења при отвореном и затвореном прекидачу за оба случаја



Решење

A_{IL} [dB]

затворен

отворен

однос

редно

0,11

10,16

10,05

паралелно

0,03

7,08

7,05

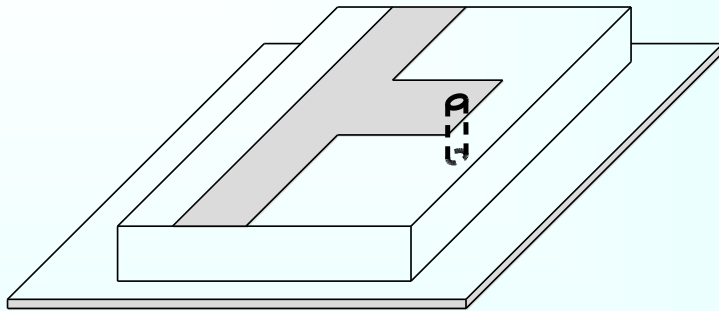


Вије и мостови

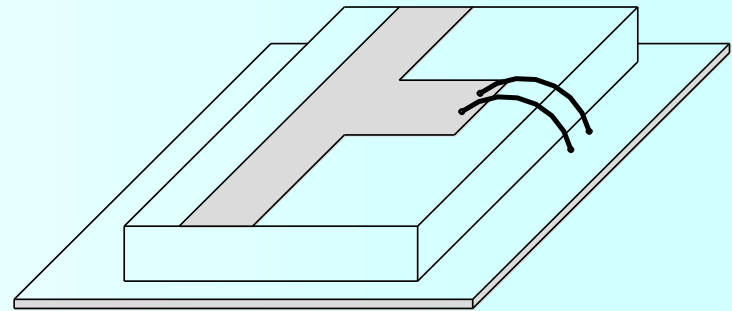
- Електричне везе изван равни метализације
- За паралелно повезивање елемената или кратак спој код микротракастог вода – **вије, жичани и тракасти спојеви**
- За “прескакање” једног проводника преко другог – **МОСТОВИ**
- (Кратак спој микротракастог вода може се остварити и $\frac{1}{4}$ -таласним отвореним огранком, али...)



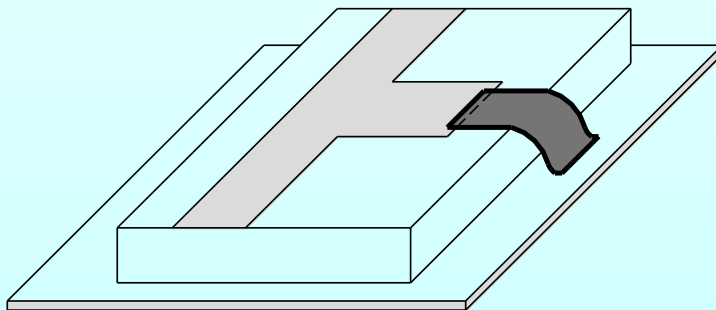
Вије, жичани и тракасти спојеви



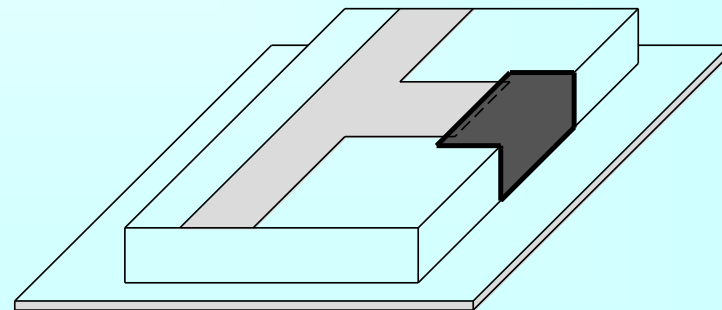
Вија (via hole)



Жичани спој (wire bond)



Тракасти спој (ribbon bond)



Обухватни тракасти спој
(wrap around)



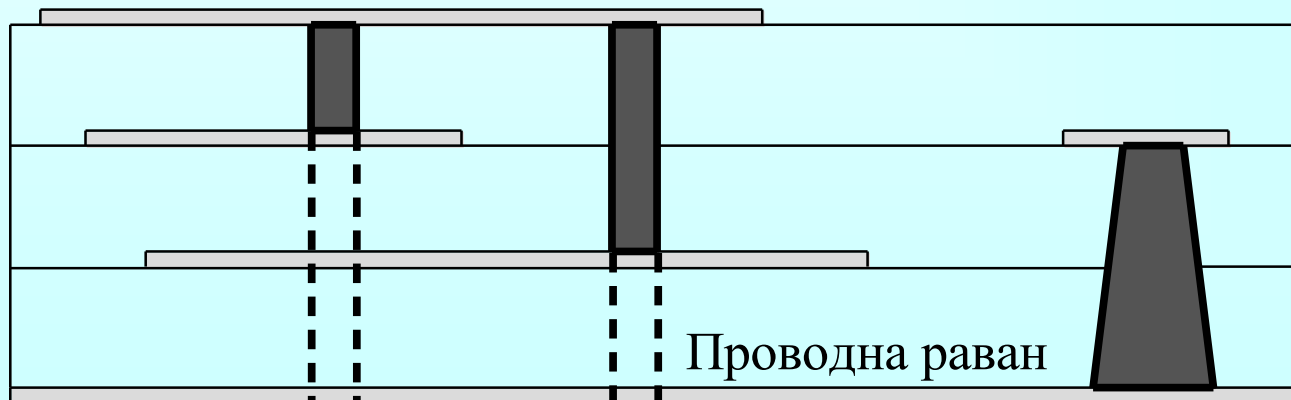
Вије, жичани и тракасти спојеви

- Пожељне особине спојева:
 - мали паразитни ефекти (паразитна индуктивност)
 - једноставност производње
- Вије имају мању паразитну индуктивност (али имају и паразитну капацитивност).
- Тракасти и жичани спојеви су нешто једноставнији за производњу (и јефтинији), али морају да буду на ивици плочице.
- Жичани спојеви се много користе код ММІС за $f < 3 \text{ GHz}$, јер су паразитни ефекти мали.



Вије: *фабрикација*

- У штампаној технологији – електролитичка депозиција (наношење) бакра на зидове избушених рупа.
- У LTCC технологији – испуњавање рупа проводном пастом. Механичко и ласерско бушење.





Вије: *паразитни ефекти*

- Индуктивност, отпорност и капацитивност (према маси)

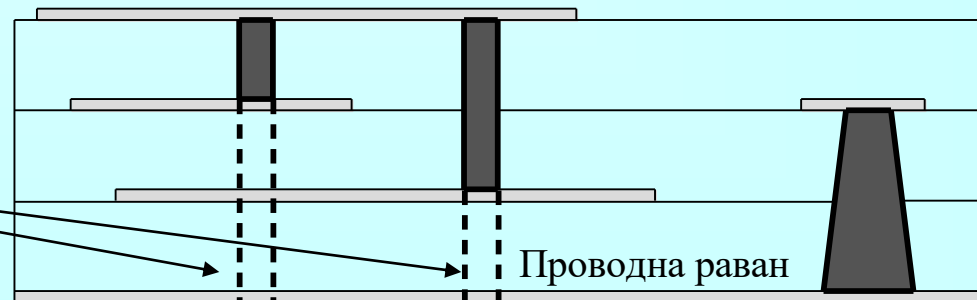
$$L_{\text{via}} = 0,2 \left[h - \ln \left(\frac{h + \sqrt{r^2 + h^2}}{r} \right) + \frac{3}{2} \left(r - \sqrt{r^2 + h^2} \right) \right] \text{ pH}$$

$$r, h [\mu\text{m}]$$

$$R_{\text{via}} = R_{\text{DC}} \sqrt{1 + \frac{f}{f_{\delta}}}$$

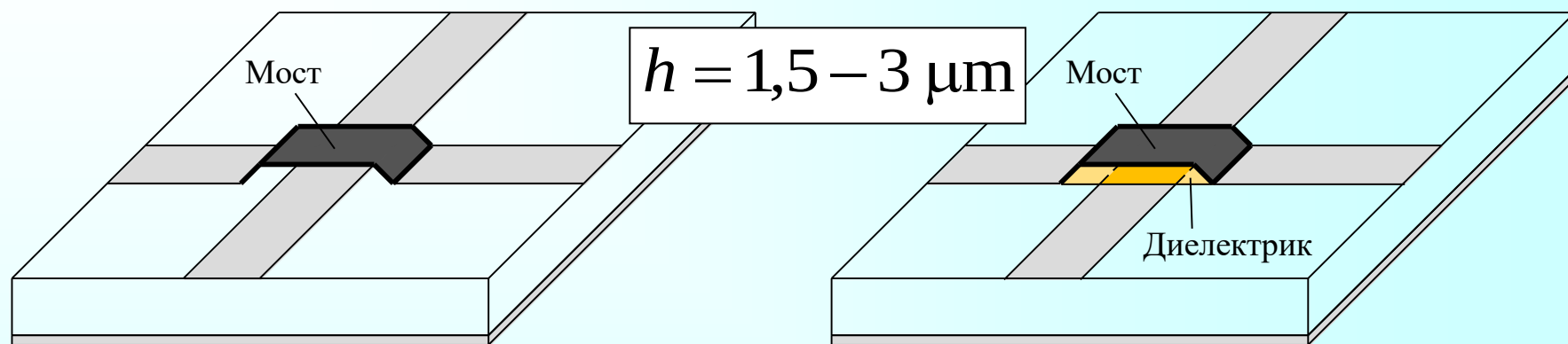
$$f_{\delta} = \left(\pi \mu_0 \sigma d^2 \right)^{-1}$$

капацитивност према маси



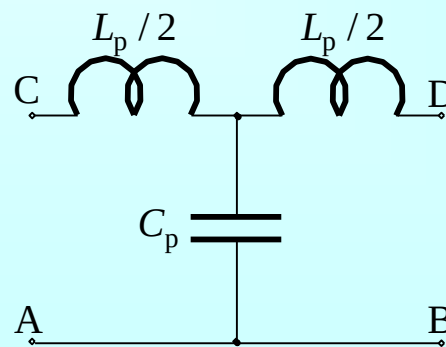
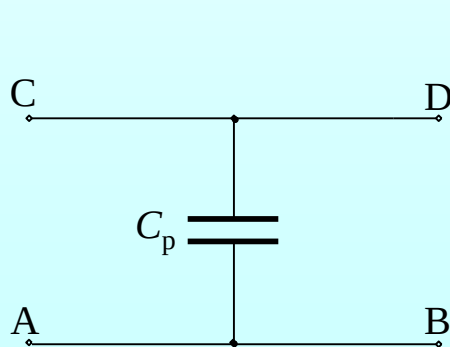


Мостови



Ваздушни мост (airbridge)

Диелектрични мост (dielectric crossover)



Еквивалентна кола



MEMS компоненте

- MEMS = **M**icro**E**lectro**M**echanical Systems
- NEMS (нанотехнологије)
- Електростатичке силе, површински напон, кохезија, атхезија,...
- Димензије MEMS направа: $1\text{ }\mu\text{m} - 1\text{ mm}$
- У микроталасним колима – прекидачи.

