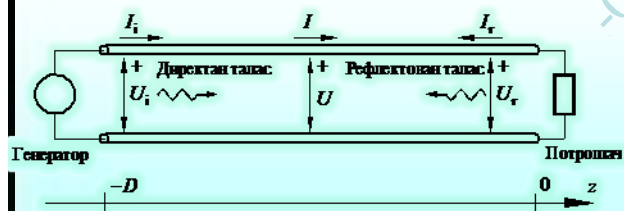




Пројектовање микроталасних филтара

Структуре за вођење електромагнетских таласа





Систем за вођење завршен потрошачем



$$\mathbf{E}_{t,i} = A_{i0} \mathbf{e}_t e^{-j\beta z}$$

$$\mathbf{E}_{t,r} = A_{r0} \mathbf{e}_t e^{+j\beta z}$$

$$\mathbf{E}_t = A_{i0} \mathbf{e}_t \left(e^{-j\beta z} + \Gamma_0 e^{+j\beta z} \right)$$

Коефицијент рефлексије

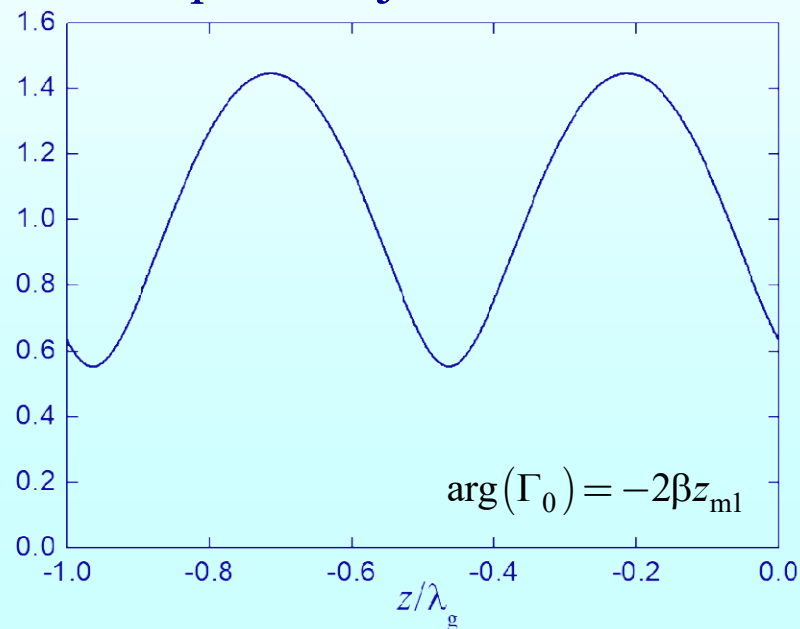
$$\Gamma(z) = \frac{E_{t,r}}{E_{t,i}} = \frac{A_{r0}}{A_{i0}} e^{j2\beta z} = \Gamma_0 e^{j2\beta z}$$

Коефицијент стојећих таласа

$$\sigma = \frac{|\mathbf{E}_t(x_0, y_0)|_{\max}}{|\mathbf{E}_t(x_0, y_0)|_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma_0|}{1 - |\Gamma_0|} \Rightarrow \Gamma_0$$

$$\frac{|\mathbf{E}_t(x_0, y_0, z)|}{|\mathbf{E}_{t,i}(x_0, y_0, z_0)|}$$

Крива стојећих таласа



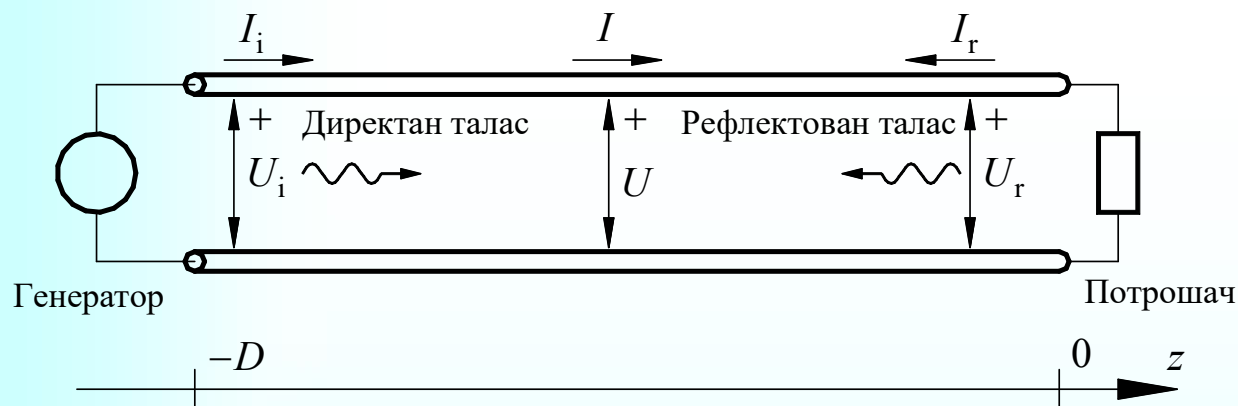
Анализа вођених таласа методима теорије кола



- Строга ЕМ анализа је сложена и дуготрајна
- Подела кола на аутономне целине које се описују мрежама са више приступа (портова)
- Решења: напони и струје приступа, трансфер функције, комплексни интензитети таласа, s -параметри
- За ТЕМ (и \approx квази-ТЕМ) талас постоје напони (у трансв. равнима!) и струје
- За ТЕ, ТМ, хибридне: еквивалентни вод



ТЕМ таласи

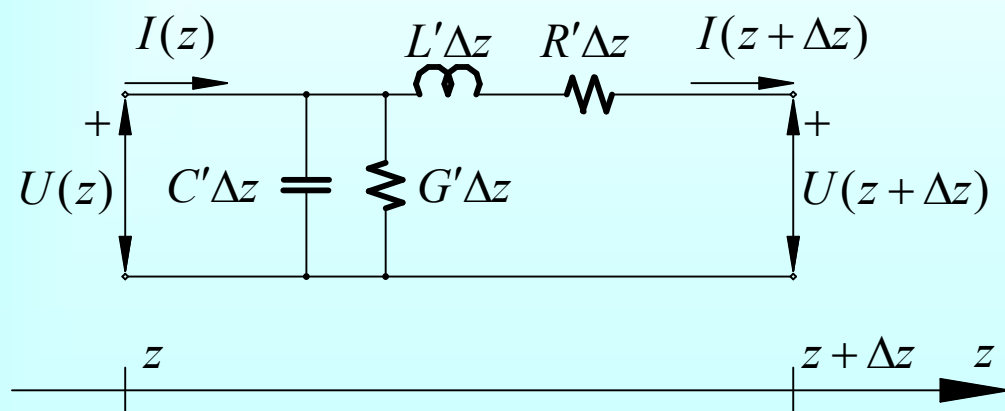


Таласи

$$U_i = U_{i0} e^{-\gamma z} \quad U_r = U_{r0} e^{+\gamma z}$$

$$I_i = I_{i0} e^{-\gamma z} \quad I_r = I_{r0} e^{+\gamma z}$$

Кратка секција (одсечак) вода



$$\frac{dU}{dz} = -Z'I \quad \frac{dI}{dz} = -Y'U$$

Примарни параметри

$$Z' = R' + j\omega L' \quad Y' = G' + j\omega C'$$

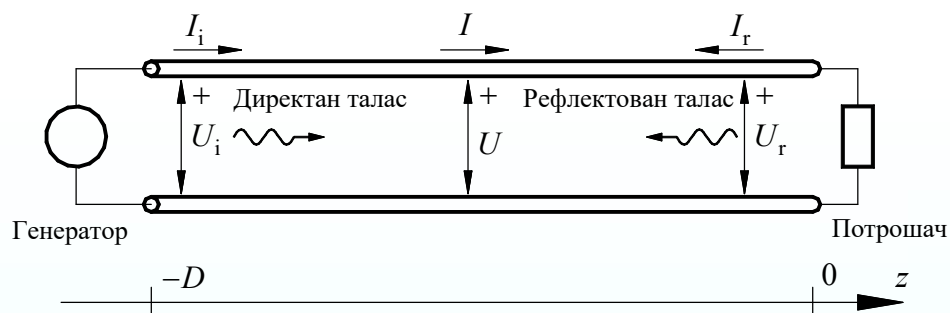
$$C'_e = C' - (j/\omega)G'$$

$$R' = P'_p / |I|^2$$

$$L' = L'_e + L'_i = \Phi'/I + R'/\omega$$



Секундарни параметри



Карактеристична импеданса:

$$Z_c = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_{i0}}{I_{i0}} = \frac{U_r}{I_r} = \frac{U_{r0}}{I_{r0}}$$

за вод са малим губицима

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

$$Z_c = \frac{1}{c_\phi C'} = \frac{F_v}{c_0 C'_0}$$

Комплексни коефицијент простирања, фазни коеф., коеф. слабљења:

$$\gamma = \sqrt{Z'Y'} = \alpha + j\beta$$

$$\beta = \omega\sqrt{L'C'}$$

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_d = \frac{R'}{2Z_c} + \frac{G'}{2Y_c}$$

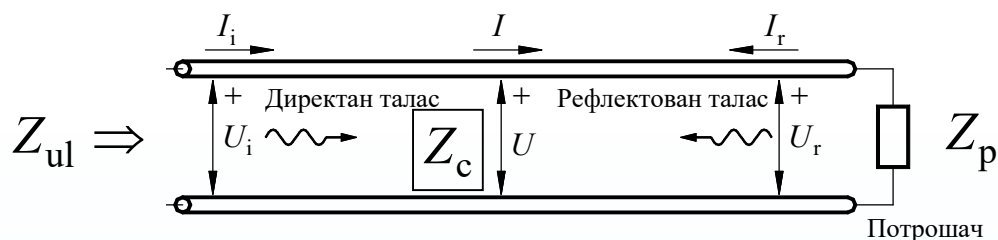
Фазна брзина:

$$c_\phi = 1/\sqrt{L'C'}$$

$$c_0 = 299.792.458 \text{ m/s}$$



Вод завршен потрошачем



$$\Gamma(z) = \Gamma_0 e^{2\gamma z} = \Gamma_0 e^{-2\gamma D}$$

$$\Gamma_0 = \frac{Z_p - Z_c}{Z_p + Z_c}$$

$Z_p = Z_c$, $\Gamma = 0$ прилагођен вод

Секција (одсечак) вода је трансформатор импедансе.

Улазна импеданса:

$$Z_{ul} = Z_c \frac{Z_p + Z_c \operatorname{th}(\gamma D)}{Z_c + Z_p \operatorname{th}(\gamma D)}$$

са губицима

$$Z_{ul} = Z_c \frac{Z_p + jZ_c \operatorname{tg}(\beta D)}{Z_c + jZ_p \operatorname{tg}(\beta D)}$$

без губитака

$$\operatorname{th}(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

За $|\gamma D| \ll 1$ $Z_{ul} = Z_p$

Кратка секција се "не види" (редни кратки спој)

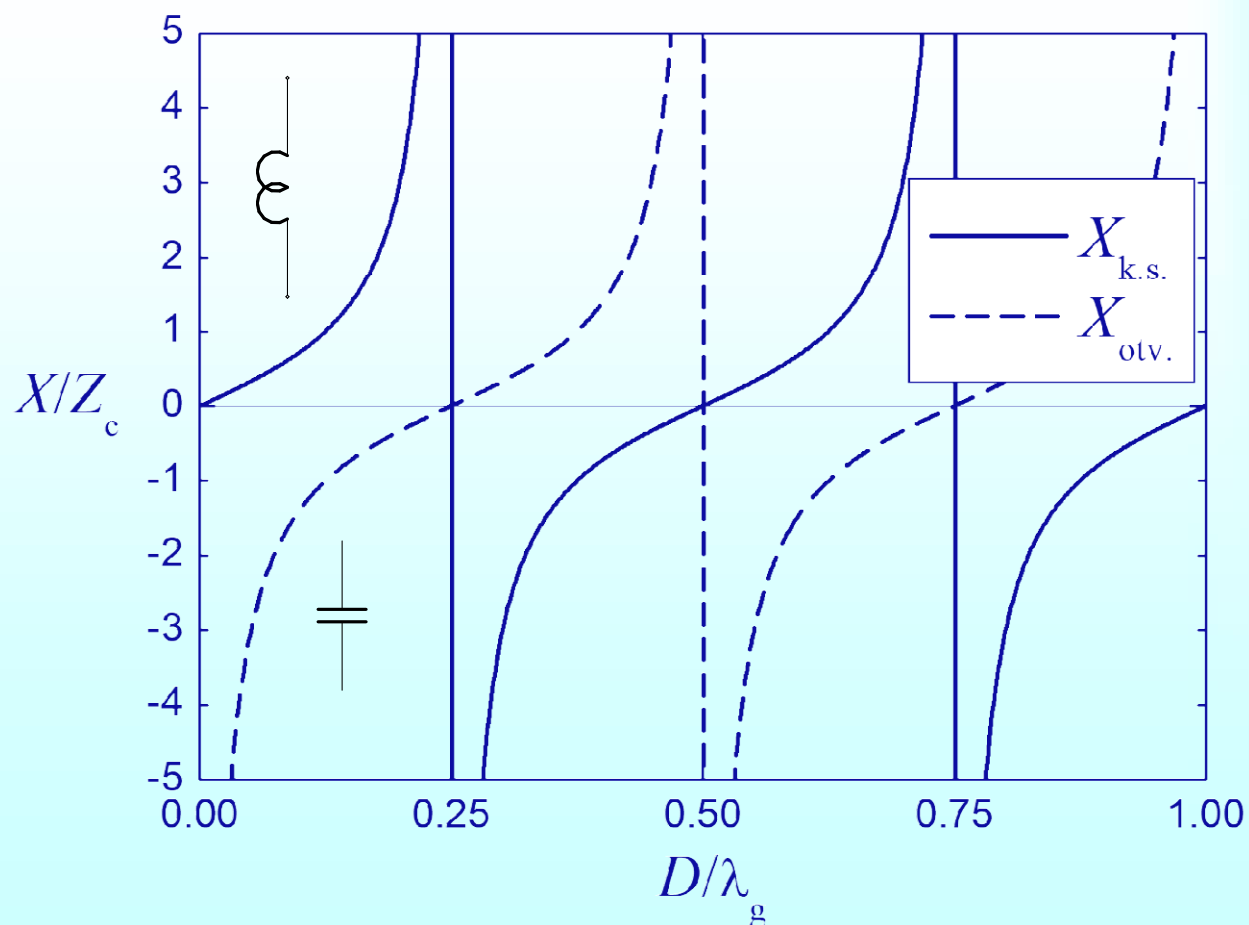


Огранак вода

Огранак вода (*stub*) је секција вода завршена кратким спојем или отвореном везом

$$Z_{k.s.} = jZ_c \operatorname{tg}(\beta D)$$

$$Z_{otv.} = \frac{Z_c}{j \operatorname{tg}(\beta D)}$$





Пример огранка вода

$$f = 3 \text{ GHz}$$

$$X = 100 \text{ } \Omega$$

$$Z_c = 50 \text{ } \Omega$$

$$\epsilon_{re} = 2$$

$$D = ?$$

$$Z_{k.s.} = jZ_c \operatorname{tg}(\beta D)$$

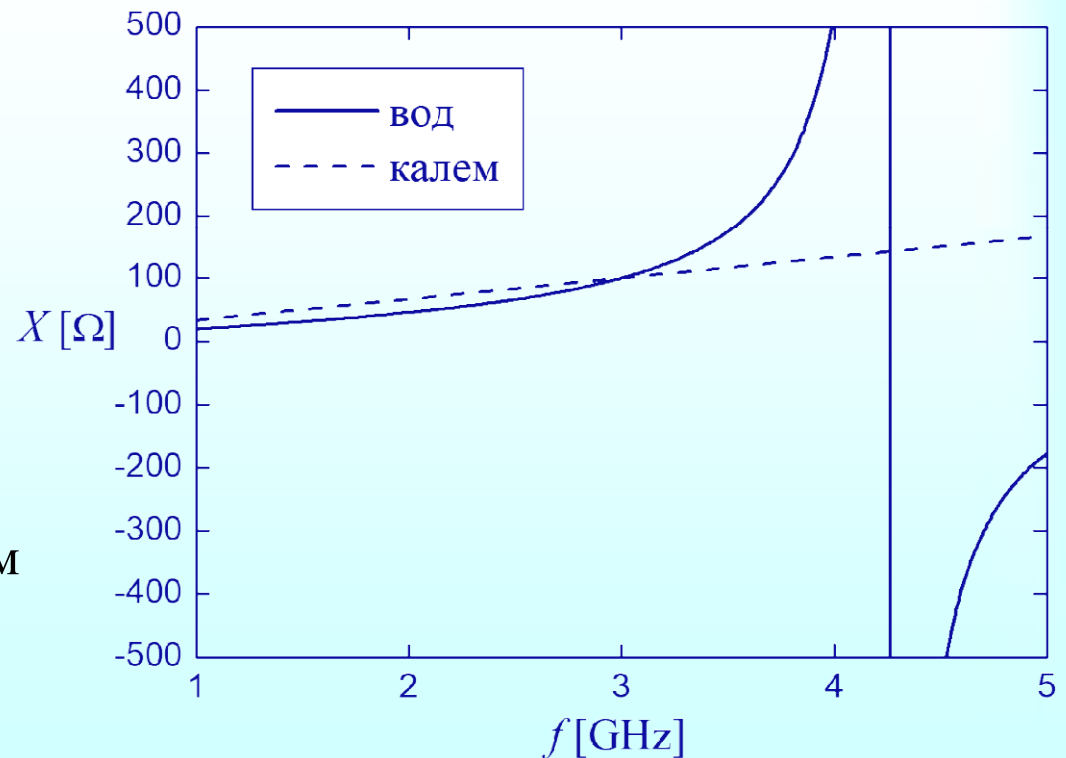
$$\beta D = \operatorname{arctg} 2$$

$$\beta = 2\pi f \sqrt{\epsilon_{re}} / c_0$$

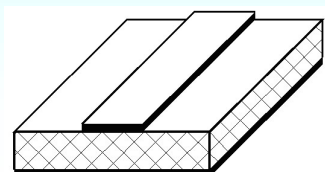
$$c_0 = 299792458 \text{ m/s}$$

$$D = 12,45 \text{ mm} \quad \text{огранак}$$

$$L = X / \omega = 5,31 \text{ nH} \quad \text{идеалан калем}$$



Реалан калем има резонанције и антирезонанције и понаша се слично као кратко спојени огранак (али не исте дужине)!



Планарни водови

Планарна микроталасна кола



Шта су планарна кола?

- У савременој микроталасној техници доминирају кола израђена у техници штампаних веза (планарна кола)
- Проводници се налазе у једној или више равни, на површи диелектричних носача (подлога, супстрата)
- Толеранције су, типично, реда величине $10 \mu\text{m}$



Погодности планарних кола

- Мале димензије
- Одлична поновљивост у производњи
- Велика поузданост
- Мала тежина (avionics & portables)
- Лако се монтирају дискретни елементи
- Основа за израду ММІС – монолитних микроталасних интегрисаних кола



Недостаци?

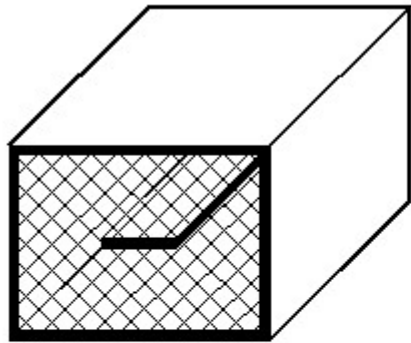
- Максимална снага коју могу да издрже планарна кола је **релативно мала** због малих растојања између проводника, лоше топлотне проводности и због оштрих ивица
- Губици у планарним колима су **знатно већи** због малих димензија проводника, оштрих ивица, као и због присуства диелектричног носача, него у класичним колима
- Фактори доброте мањи за ред величине



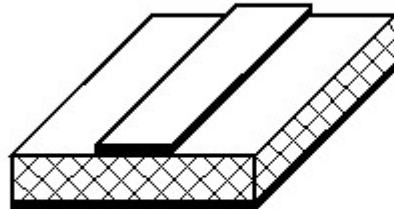
Основна функционалност

- Пренос сигнала на врло мала растојања (реда величине неколико центиметара)
- Обрада сигнала као што је филтрирање
- Имплементација склопова и микроталасних подсистема телекомуникационих и других уређаја

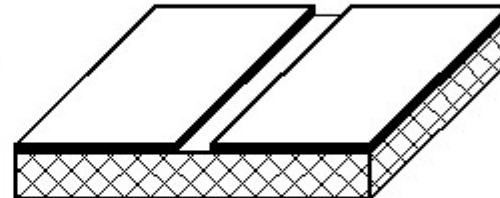
Планарни водови



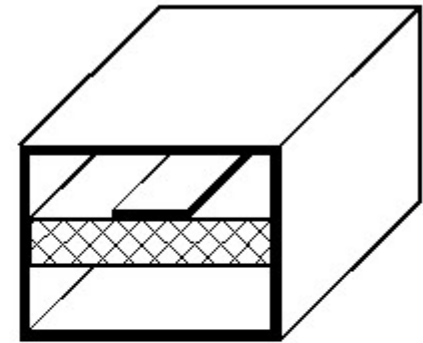
(a)



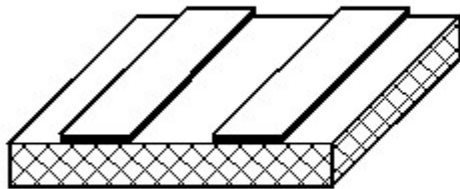
(б)



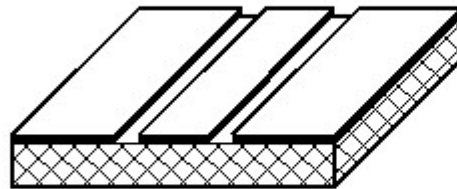
(в)



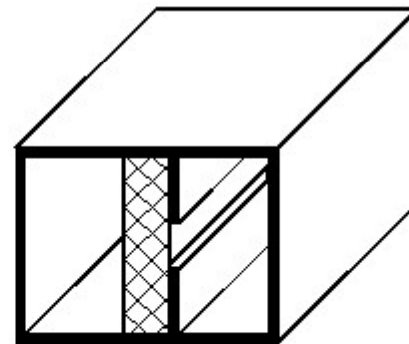
(г)



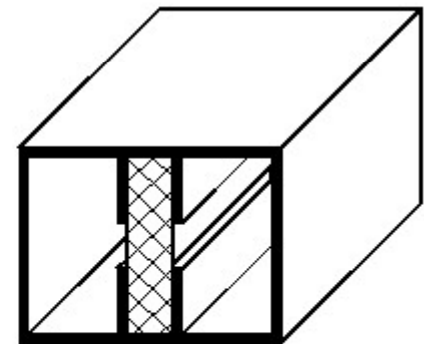
(д)



(е)



(ж)



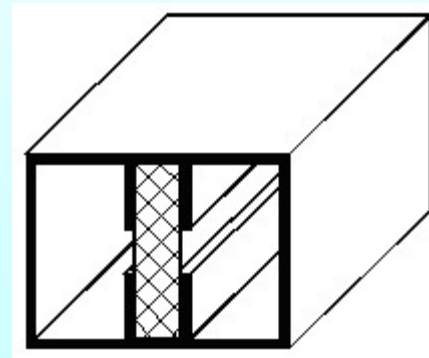
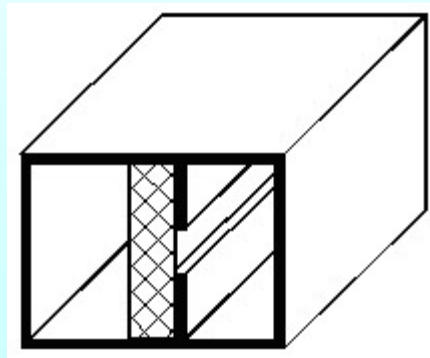
(з)

(a) симетрични тракасти вод (strip line), (б) микротракасти вод (microstrip line), (в) прорезни вод (slot line), (г) тракасти вод са издигнутом подлогом (suspended substrate strip line), (д) копланарни вод (coplanar line), (е) копланарни таласовод, и (ж) прорезни вод у таласоводу (finline)



Радне учестаности?

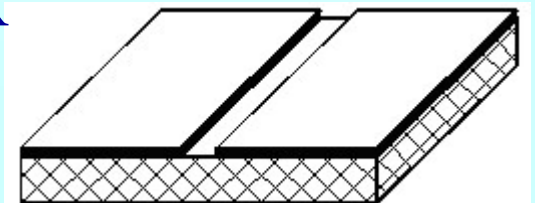
- Првенствено у области дециметарских
- и центиметарских таласа
- Продиру у област милиметарских таласа (посебно, прорезни вод у таласоводу)





Који се тип таласа простире?

- Само **хибридни типови** таласа се могу простирати по планарним водовима због нехомогености диелектрика
- Код свих планарних водова, осим код **прорезног вода** и **прорезног вода** у таласоводу, при ниским учестаностима **лонгитудиналне** компоненте поља су знатно **мање** од трансверзалних





Прорачун планарних водова

- Строга теоријска анализа планарних водова заснива се на **нумеричким** поступцима
- За инжењерску праксу је пожељно имати једноставне приближне **формуле** за карактеристичну импедансу и таласну дужину при радној учестаности



Квази-ТЕМ анализа

- *Квази-ТЕМ* апроксимација простирања ЕМ таласа дуж водова са нехомогеним диелектриком заснива се на претпоставци да и електрично и магнетско поље имају практично **само трансверзалне** компоненте, а да су им **лонгитудиналне** компоненте **занемарљиво** мале
- Оправдана је ако **учестаност** није сувише **висока**, код свих планарних водова **осим код прорезног вода** и прорезног вода у таласоводу



Подлоге за планарне водове

- На бази **тефлона** и других органских материјала, које, по правилу, имају релативну пермитивност у опсегу од око **2,1 до 2,7**
- На бази **неорганских** материјала, имају релативну пермитивност типично између **6 и 10**



Тефлонске подлоге

- Са већ налепљеним металним (бакарним) фолијама са једне или са обе стране
- Фолије се нагризају фотопоступком: остаје само потребна метализација (на пример, траке водова)
- Мешају се са керамичким материјалима: могу имати велике релативне пермитивности, око 10



Подлоге на бази тефлона

- Чешће
- Механички се лакше обрађују од керамичких подлога
- Отпорније су на ударе и вибрације
- Имају веће губитке
- Слабија резолуцију штампаних кола
- Слабија термичка проводност



Тефлон ојачан стакленим влакнима

- Одличне механичке особине:
стабилност димензија, издржљивост
- Хемијски изузетно отпоран
- Издржава велики распон температура:
 -27°C до $+260^{\circ}\text{C}$
- На њему се може лако лемити
- Термички компатибилан са бакром



Керамичке подлоге

- Врло прецизна штампа
- Мали диелектрични губици
(велики фактори доброте)
- Добро одвођење топлоте (на пример, код снажних полупроводничких активних елемената)
- Скупа израда (механичка обрада)



Подлоге на бази неорганских материјала

- Релативна пермитивност типично **6 – 10**
- Метализацију наноси сам корисник
- **Танкослојна техника:** напаравање метализације (злата), нагризање метализације **фотопоступком**
- **Дебелослојна техника:** наношење пасте која садржи метал само на потребним местима, кроз посебан застор, па се онда, **загревањем**, паста активира тако да се ствара метализација



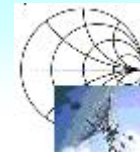
FR-4 (витропласт)

- Ниска цена
- Комерцијалне примене при **нижим** учестаностима
- **Велики диелектрични губици**
- Израда вишеслојних штампаних плоча аналогних и дигиталних кола, укључујући рачунаре



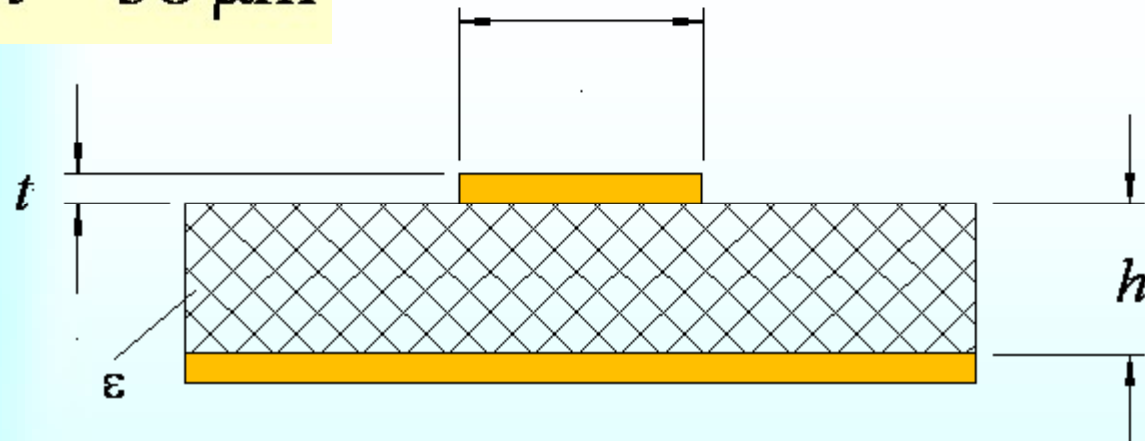
LTCC

- Последњих година су развијене технике вишеслојних штампаних кола на бази керамичких материјала (LTCC)
- Омогућавају висок степен интеграције и израду пасивних компоненти најразличитијих облика
- Превазилазе планарне облике и приближавају се тродимензионим структурама



Пример параметара FR-4

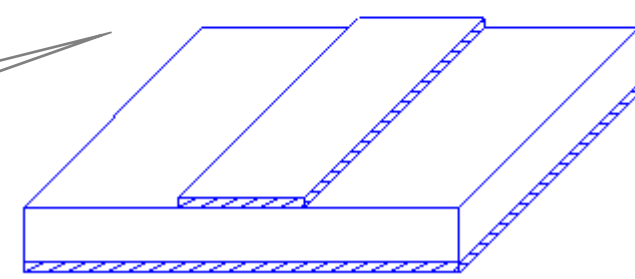
$t = 38 \mu\text{m}$



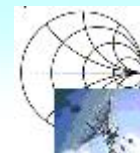
$\epsilon_r = 4,6$

$h = 1,575 \text{ mm}$

```
MSUB
Er=4.6
H=1.575 mm
T=0.038 mm
Rho=3
Tand=0.02
ErNom=4.6
Name=SUB1
```

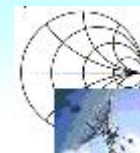


Задавање подлоге у програму *Microwave Office*



Rogers RO4003 подлога

```
D:\Download\MPK\AWRemp\mwi.exe
MAIN MENU - Microwave Design Computations, MWI-2004Jan27 GRT/Rogers Corp.
Type of design is microstrip transmission line, analytical.
Units for dimensions are in mm.
Name of substrate R04003
Dielectric thickness(DI), mm 1.575
clad Foil thickness(CT), mm 0.0173
Width of line(W), mm 3.643
Permittivity of substrate, Er 3.380
Loss of dielectric as tan delta 0.002700
RMS roughness of Cu/diel, um 1.900
GHz frequency in application 1.00000
Z0, characteristic impedance 50.00
Z0 by digital formula 103.44; Key O,R for digital Z0 comments.
Effective permittivity, Er,eff 2.676
Wavelength, mm =183.2493; Single open end fringing delta L= 0.6582
Qd(dielectric) = 416.4; Qc(conductor) = 368.3
Q0 of transmission line 195.4
In dB/meter alpha d = 0.358; alpha c = 0.404; alpha 0 = alpha d+alpha c = 0.762
Heat conductivity, W/m/K 0.6400
A Temp.rise/(RF power), K/kW 118.5; Power for <= 100+amb°C, W 843.85
B Temp.rise/(DC current)^2, K/A^2 0.1857; Current for <= 100+amb°C, A 23.20
collect menu Values in table column 1 for file MW06J24A.doc.
Other menu of extra features. exit program.
Select action by keying TUNDEWPLRGZIEQHABUOX or ↓→↑← and RET ?
```



Alumina подлога

TXLINE 2003 - Microstrip

Microstrip | Stripline | CPW | CPW Ground | Round Coaxial | Slotline | Coupled MSLine | Coupled Stripline

Material Parameters

Dielectric	Alumina	Conductor	Copper
Dielectric Constant	9.8	Conductivity	5.88E+07 S/m
Loss Tangent	0.0005		

Electrical Characteristics

Impedance	50	Ohms
Frequency	2	GHz
Electrical Length	90	deg
Phase Constant	6165.45	deg/m
Effective Diel. Const.	6.59032	
Loss	2.07883	dB/m

Physical Characteristic

Physical Length (L)	14.5975	mm
Width (W)	0.613396	mm
Height (H)	0.635	mm
Thickness (T)	0.0034	mm

Анизотропне диелектричне подлоге



- Анизотропни диелектрици у различитим правцима имају различите особине
- Кристални материјали и њихова анизотропност потиче од особина кристалне решетке
- Типичан представник анизотропних диелектрика који имају примену у микроталасним колима је сафир

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \begin{bmatrix} \epsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\parallel} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{\perp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,40 & 0 & 0 \\ 0 & 11,60 & 0 \\ 0 & 0 & 9,40 \end{bmatrix}$$

тензор пермитивности

$$\epsilon_{re} = 12,0 - \frac{1,21}{1 + 0,39 \left(\log \frac{10w}{h} \right)^2}$$

ефективна релативна пермитивност



Феритне подлоге

- Феритне подлоге користе се само ако је потребно остварити не реципрочне особине микроталасних компоненти
- За све друге примене диелектричне подлоге су боље по свим битним параметрима (као што су губици, једноставност израде, цена)

$$\bar{\bar{\mu}} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu_r & jk & 0 \\ -jk & \mu_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

тензор магнетске пермеабилности



Прорачун планарних водова

Приближни обрасци

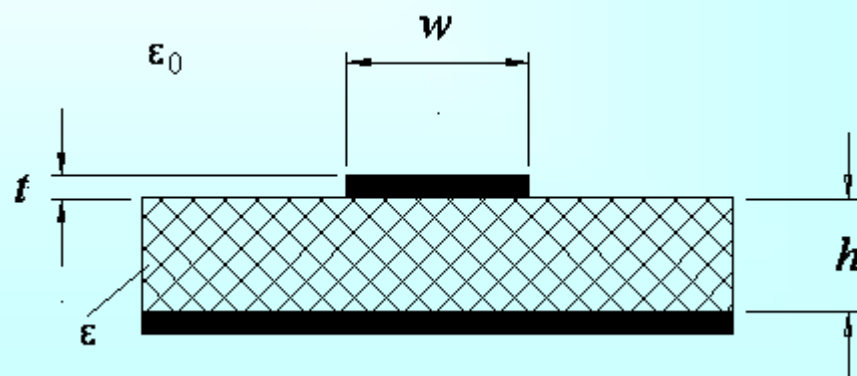


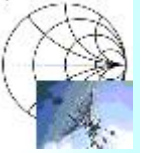
Начини прорачуна

- Строга анализа планарних водова, по правилу, захтева извесне апроксимације, или примену **нумеричких** метода
- У литератури се могу наћи различити дијаграми или приближни **обрасци** (добијени интерполацијом нумеричких резултата) за најчешће планарне водове



Микротраксти водови

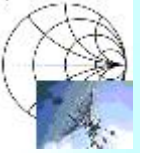




Ефективна релативна пермитивност

- *Ефективна релативна пермитивност* представља релативну пермитивност (еквивалентне) хомогене средине у којој би требало да се налазе проводници вода да би подужна капацитивност била иста као код стварног вода
- Ова пермитивност се дефинише релацијом

$$\epsilon_{re} = \frac{C'}{C'_0}$$



Величине изведене из ϵ_{re}

- Брзина простирања фазе планарног вода

$$c_{\phi} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}}$$

- Таласна дужина на воду

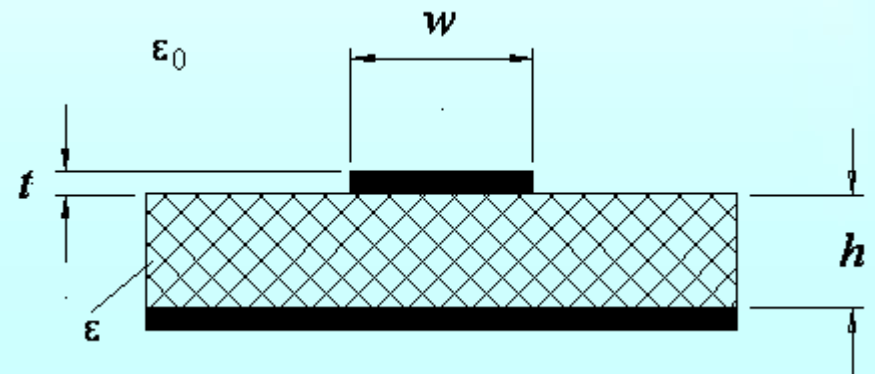
$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}}$$



Hammerstad-ова формуле

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} + 0,04 \left(1 - \frac{w}{h} \right)^2 \right), \quad \frac{w}{h} < 1,$$
$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}}, \quad \frac{w}{h} \geq 1$$

Занемарена дебљина метализације
(која је реда величине неколико
десетина μm), тј. узето да су траке
бесконачно танке



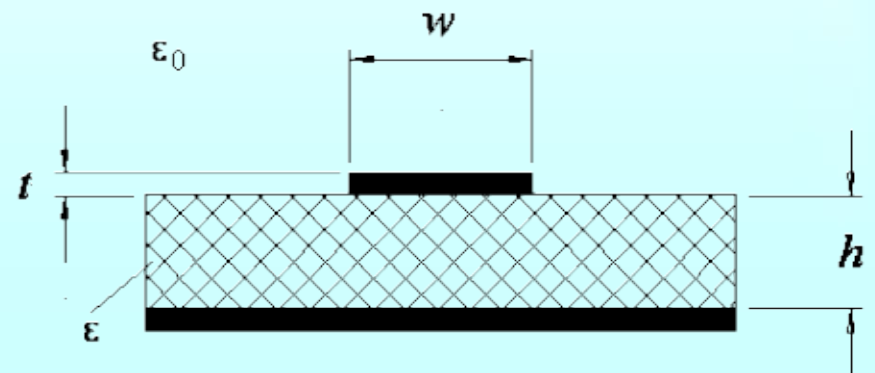


Hammerstad-Schneider формула

$$Z_c = \frac{60\Omega}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \ln\left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h}\right), \quad \frac{w}{h} < 1,$$

$$Z_c = \frac{377\Omega}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{1}{\frac{w}{h} + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{w}{h} + 1,444\right)}, \quad \frac{w}{h} \geq 1$$

Занемарена дебљина метализације
(која је реда величине неколико
десетина μm), тј. узето да су траке
бесконачно танке





Синтеза према Wheeler-у

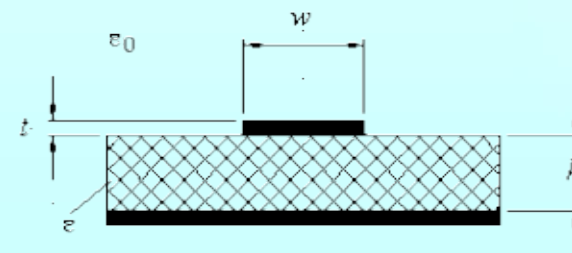
$$\frac{w}{h} = \frac{4}{0,5e^A - e^{-A}}, \quad \frac{w}{h} < 2,$$

$$\frac{w}{h} = \frac{\epsilon_r - 1}{\pi \epsilon_r} \left(\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right) + \frac{2}{\pi} (B - 1 - \ln(2B - 1)), \quad \frac{w}{h} \geq 2$$

$$A = \pi \sqrt{2(\epsilon_r + 1)} \frac{Z_c}{Z_0} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\epsilon_r} \right),$$

$$B = \frac{\pi}{2\sqrt{\epsilon_r}} \frac{Z_0}{Z_c}$$

$$Z_0 \approx 377 \Omega$$





Дебљина метализације

$$w_e = w + \frac{t}{\pi} \left(1 + \ln \left(\frac{2x}{t} \right) \right)$$

$$x = h, \quad w > \frac{h}{2\pi}$$

$$x = 2\pi w, \quad 2t < w \leq \frac{h}{2\pi}$$

Приближно, узимање у обзир дебљине метализације се своди на замену стварне ширине траке у изразима за анализу микрострипа ефективном ширином траке



Губици у проводницима

$$\alpha_p = \frac{1}{2\pi h} \frac{R_s}{Z_c} \frac{32 - \left(\frac{w}{h}\right)^2}{32 + \left(\frac{w}{h}\right)^2} \left(1 + \frac{h}{w} \left(1 + \frac{\partial w_e}{\partial t}\right)\right), \quad \frac{w}{h} < 1$$

$$\alpha_p = \frac{1}{h} \frac{\varepsilon_{re} Z_c R_s}{Z_0^2} \left(\frac{w}{h} + \frac{6h}{w} \left(\left(1 - \frac{h}{w}\right)^5 + 0,08\right)\right) \left(1 + \frac{h}{w} \left(1 + \frac{\partial w_e}{\partial t}\right)\right), \quad \frac{w}{h} \geq 1$$

$$\frac{\partial w_e}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{2h}{t}\right), \quad w < \frac{h}{2\pi}$$

$$\frac{\partial w_e}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{4\pi w}{t}\right), \quad w \geq \frac{h}{2\pi}$$

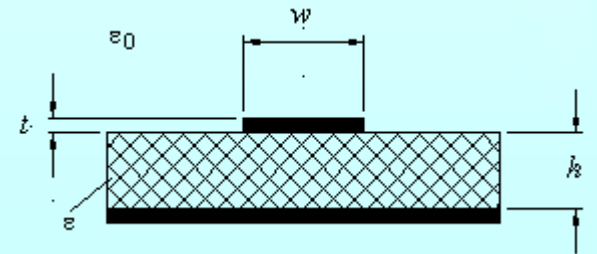
Изрази дају резултате који су чак и до **два пута мањи** од резултата мерења зато што су у пракси губици у проводницима повећани услед **храпавости** површи метала



Процена губитака

$$\alpha_p = \frac{R_s}{wZ_c}$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi\mu_p f}{\sigma_p}}$$





Губици у диелектрику

$$\alpha_d = \pi \frac{\epsilon_{re} - 1}{\epsilon_r - 1} \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{re}} \frac{\text{tg}(\delta)}{\lambda_g}$$

$$\alpha = \alpha_p + \alpha_d$$



Губици услед зрачења

Приближно сразмерни са

$$(hf)^2 / \sqrt{\epsilon_r}$$

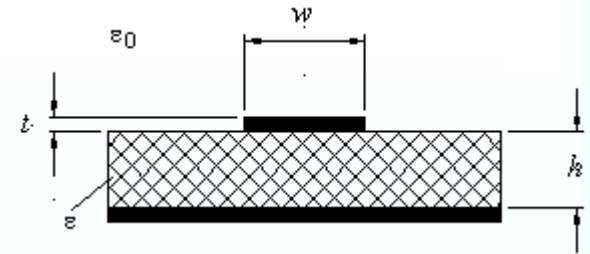
$$f_m[\text{GHz}] = 2,14 \frac{\sqrt[4]{\epsilon_r}}{h[\text{mm}]}$$

Учестаност при којој се
1% снаге инцидентног таласа
на отвореном крају
микротракастог вода израчи



Коригована пермитивност

$$\epsilon_{re}(f) = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_{re}(0)}{1 + \left(\frac{f}{f_p}\right)^2} G$$

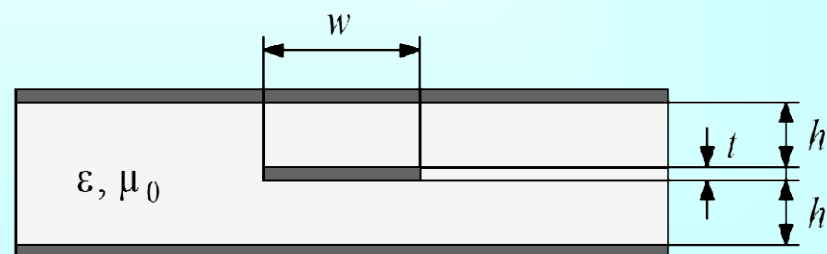


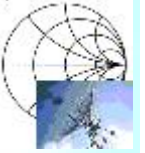
$$f_p = \frac{1}{2\mu_0} \frac{Z_c}{h}, \quad G = 0,6 + 0,009Z_c[\Omega]$$

Са променом учестаности мења се ефективна пермитивност и микротракасти вод постаје **дисперзиван**

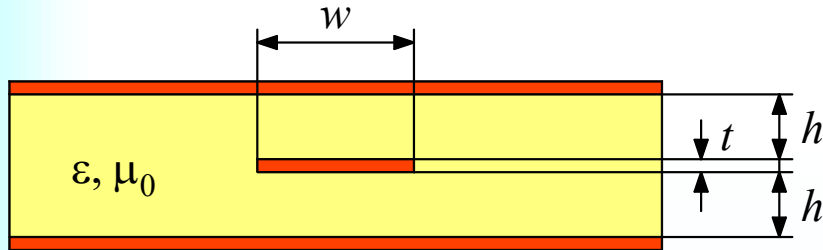


Тракасти водови





Симетричан тракасти вод

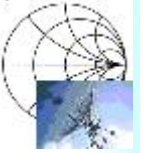


$$Z_c = \frac{Z_0}{4} \frac{K(u)}{K'(u)}, \quad u = \frac{1}{\operatorname{ch}\left(\frac{\pi w}{4h}\right)}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$

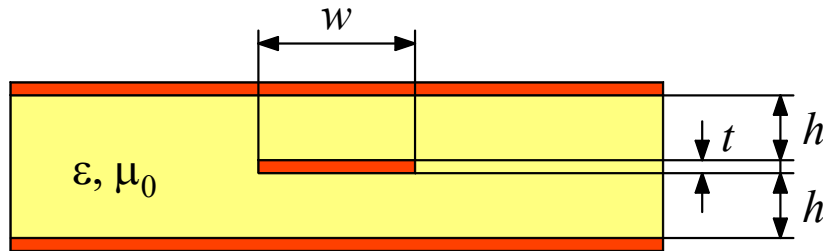
$$K(u) = \int_0^{\pi/2} \left(1 - u^2 \sin^2 \phi\right)^{-1/2} d\phi$$

Занемарена дебљина метализације (која је реда величине неколико десетина μm), тј. узето да су траке бесконачно танке

$$\frac{K'(u)}{K(u)} = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{u'}}{1 - \sqrt{u'}} \right), & 0 \leq u \leq \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\pi}{\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{u}}{1 - \sqrt{u}} \right)}, & \frac{\sqrt{2}}{2} \leq u \leq 1. \end{cases}$$



Коначна дебљина метализације



$$Z_c = \frac{30 \Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(1 + \frac{A}{2} \left(A + \sqrt{A^2 + 6,27} \right) \right),$$

$$A = \frac{16h}{\pi w_e}$$

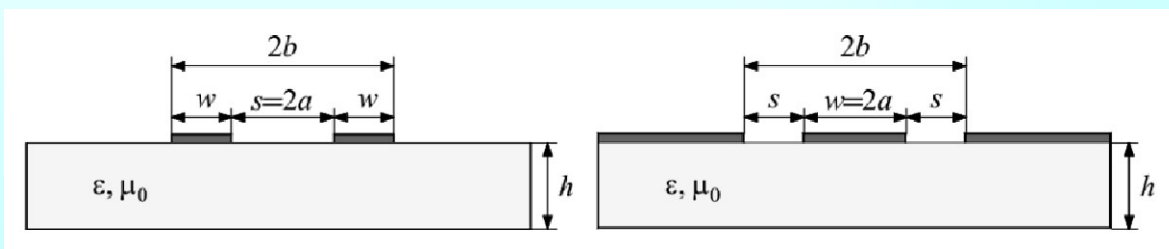
$$w_e = w + \Delta w$$

$$\Delta w = \frac{t}{\pi} \left(1 - \frac{1}{2} \ln \left(\left(\frac{1}{1 + 4h/t} \right)^2 + \left(\frac{0,0796}{1,1 + w/t} \right)^m \right) \right)$$

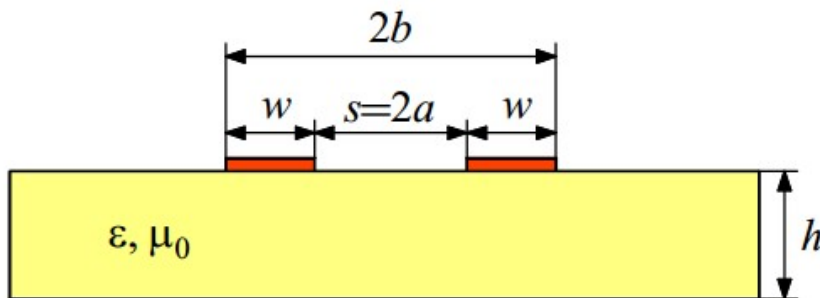
$$m = \frac{6}{3 + t/h}$$



Симетричан копланарни вод и копланарни таласовод

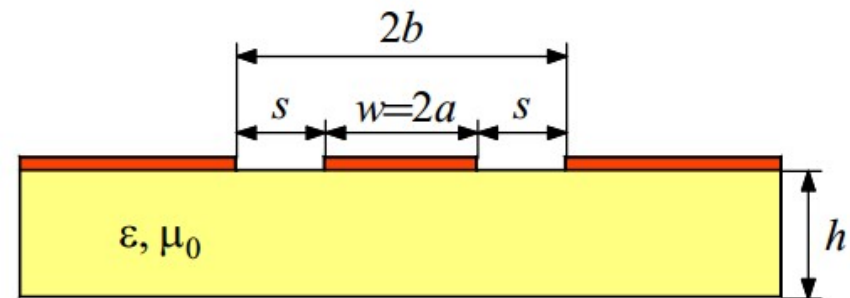


Копланарни вод и таласовод (1/2)



копланарни вод

$$Z_c = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{K(u_1)}{K'(u_1)},$$



копланарни таласовод

$$Z_c = \frac{Z_0}{4\sqrt{\epsilon_{re}}} \frac{K'(u_1)}{K(u_1)},$$

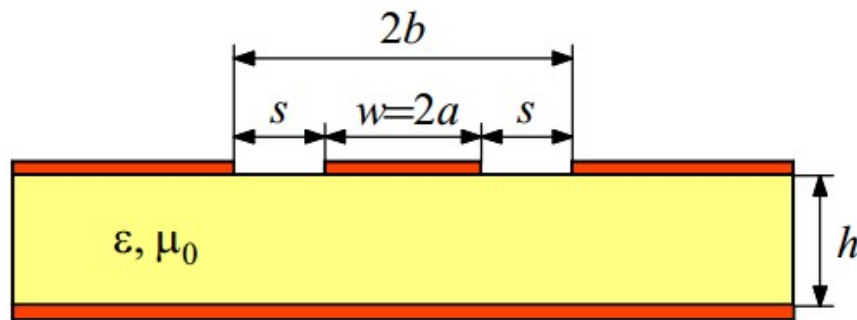
$$\epsilon_{re} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{K'(u_1)}{K(u_1)} \frac{K(u_2)}{K'(u_2)},$$

$$u_1 = \frac{a}{b}, \quad u_2 = \frac{A}{B},$$

$$A = \operatorname{sh}\left(\frac{\pi a}{2h}\right), \quad B = \operatorname{sh}\left(\frac{\pi b}{2h}\right)$$



Копланарни вод и таласовод (2/2)

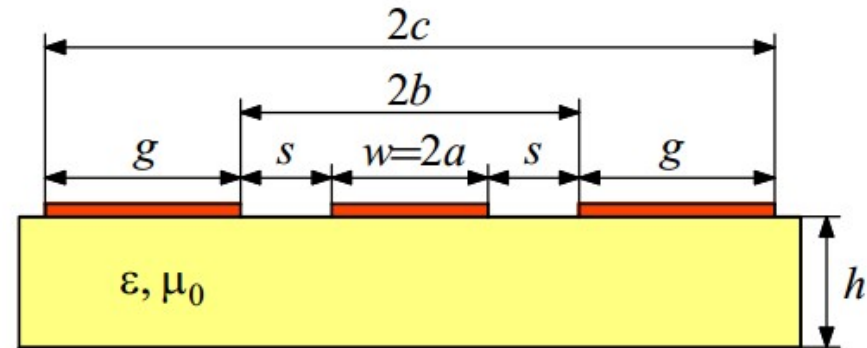


симетричан копланарни таласовод са проводном равни

$$Z_c = \frac{Z_0}{2\sqrt{\epsilon_{re}}} \left(\frac{K(u_1)}{K'(u_1)} + \frac{K(u_2)}{K'(u_2)} \right)^{-1},$$

$$\epsilon_{re} = 1 + (\epsilon_r - 1) \left(\frac{K(u_1)}{K'(u_1)} \frac{K'(u_2)}{K(u_2)} + 1 \right)^{-1}$$

$$u_1 = \frac{a}{b}, \quad u_2 = \operatorname{th} \left(\frac{\pi a}{2h} \right) / \operatorname{th} \left(\frac{\pi b}{2h} \right)$$



симетричан копланарни таласовод коначне ширине референтног проводника (“маса”)

$$u_1 = \frac{a}{b} \sqrt{\frac{c^2 - b^2}{c^2 - a^2}}, \quad u_2 = \frac{A}{B} \sqrt{\frac{C^2 - B^2}{C^2 - A^2}}$$

$$C = \operatorname{sh} \left(\frac{\pi c}{2h} \right),$$

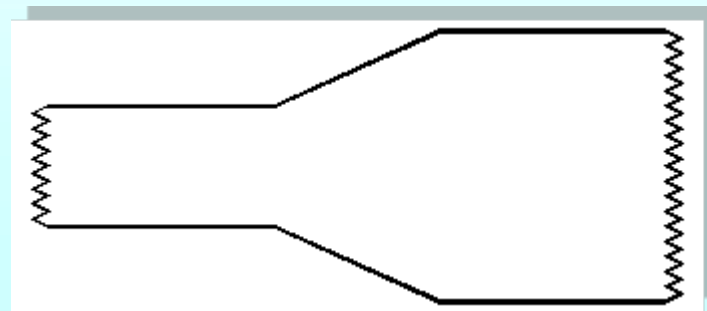
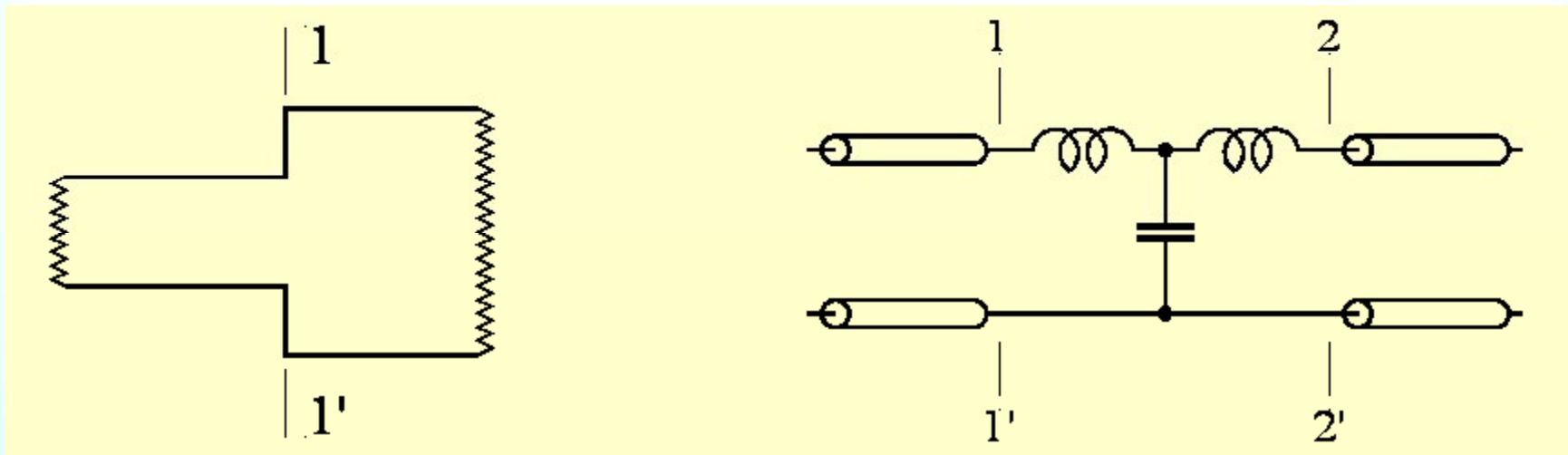


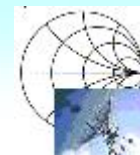
Микроталасне компоненте

Дисконтинуитети и основна кола

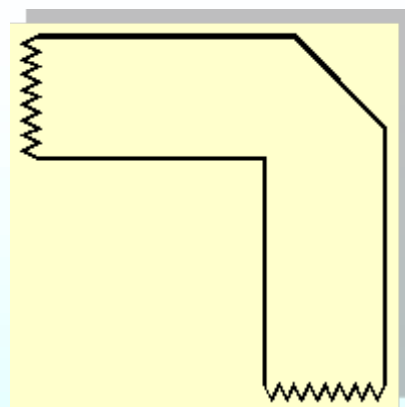


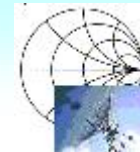
Спој два микротракаста вода



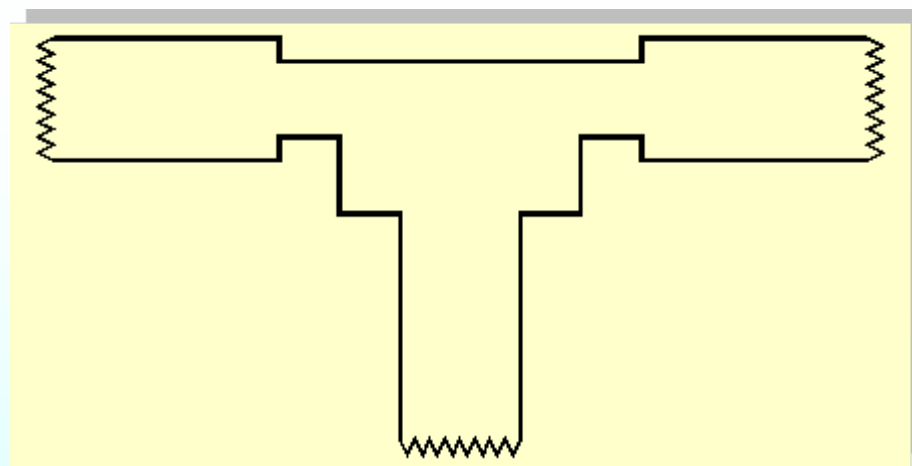


Компензовани савијутак





Компензовани спој три вода





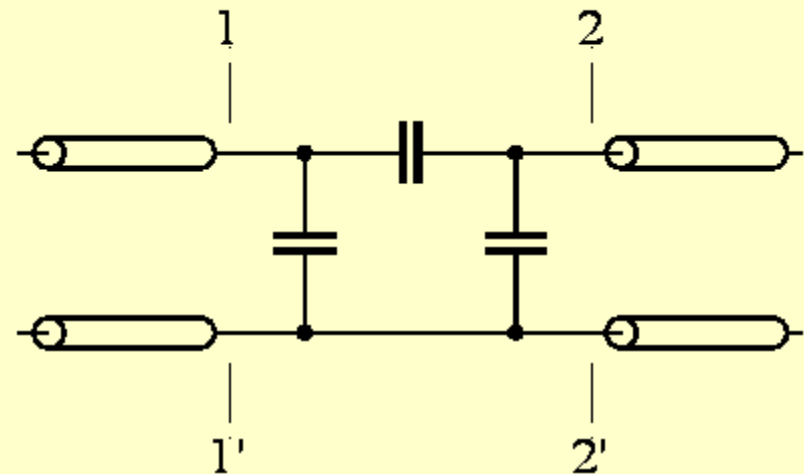
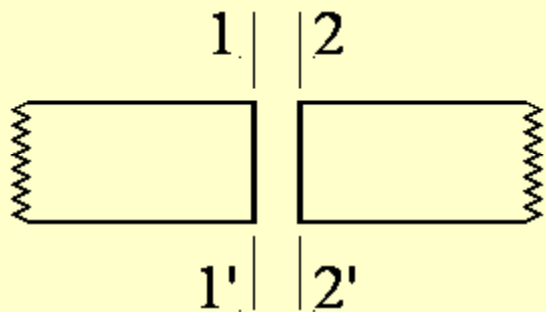
Отворен крај вода

$$\frac{\Delta l}{h} = 0,412 \frac{\epsilon_{re} + 0,3}{\epsilon_{re} - 0,258} \frac{\frac{w}{h} + 0,264}{\frac{w}{h} + 0,8}$$

Отворен крај микротракастог вода се, еквивалентно, понаша као вод завршен малом (паразитном) **капацитивношћу**, која је последица ивичних ефеката на крају: отворен вод се понаша као да је **дужи** него што му је физичка дужина (продужење је еквивалентно паразитној капацитивности)



Процеп

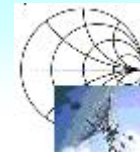


Попречан процес у траци проводника микротракастог вода представља, еквивалентно, **капацитивност уметнуту у вод**: због ивичних ефеката, у еквивалентној шеми се јављају још две капацитивности између крајева водова и масе

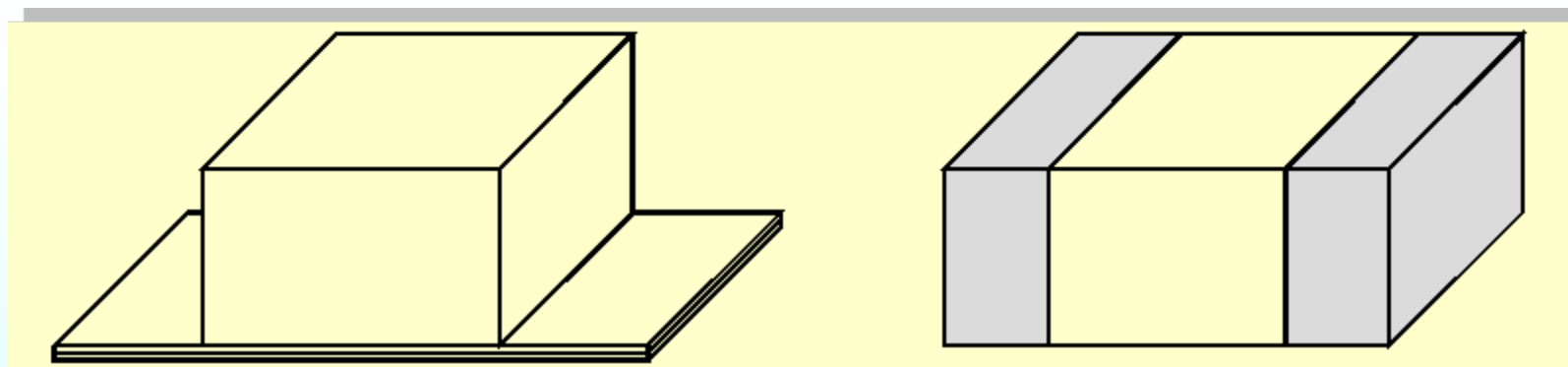


Кратак спој

- Избуши се једна или више рупа кроз носач, у равни кратког споја, и кроз те отворе споји се трака вода и маса
- Рупе се метализују
- Понаша се као паразитна индуктивност
- Вод се понаша као идеално кратко спојен вод, али нешто веће дужине



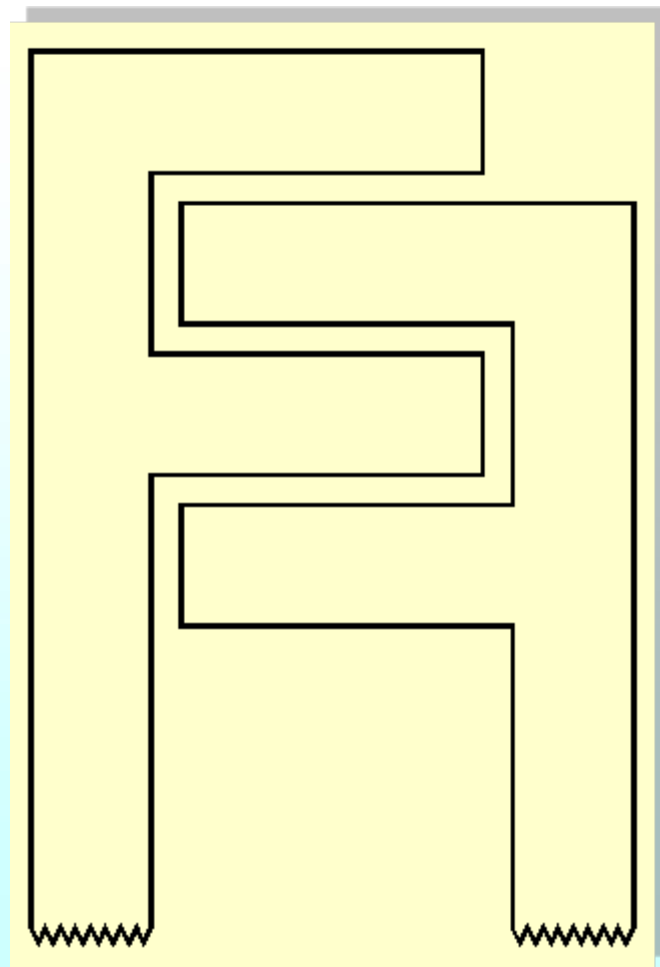
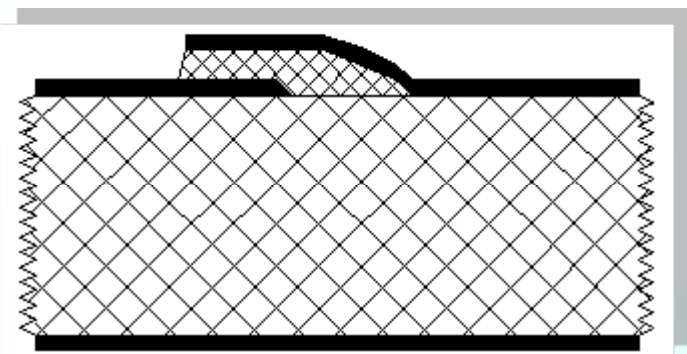
Дискретни елементи

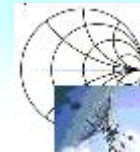


Изводи су у облику **трака**, које се причвршћују на штампане проводнике на диелектричној подлози, или су крајеви паковања прилагођени за лемљење на штампане проводнике

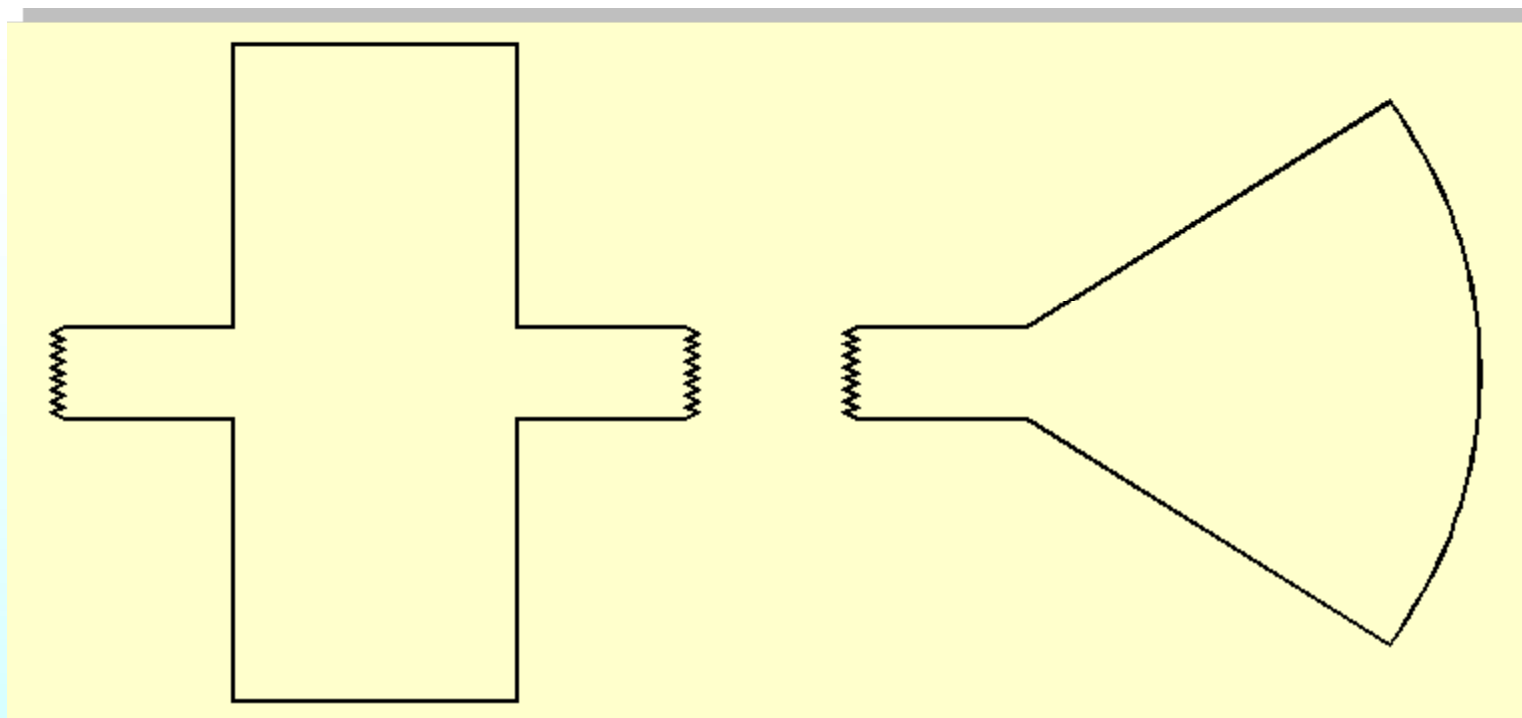


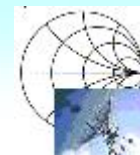
Редне капацитивности



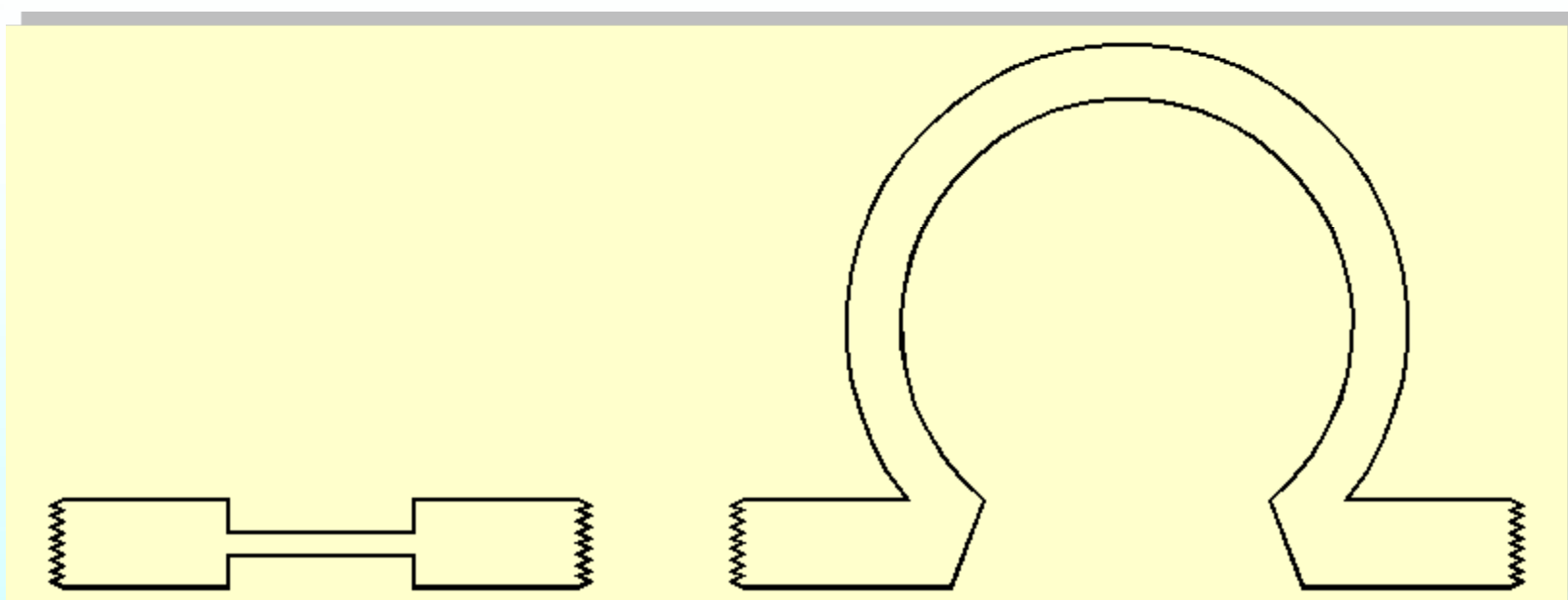


Паралелне капацитивности



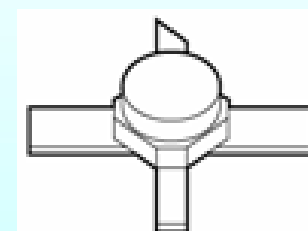
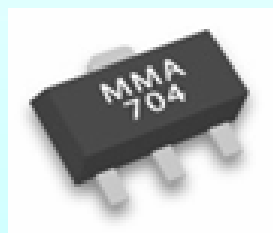


Редне индуктивности



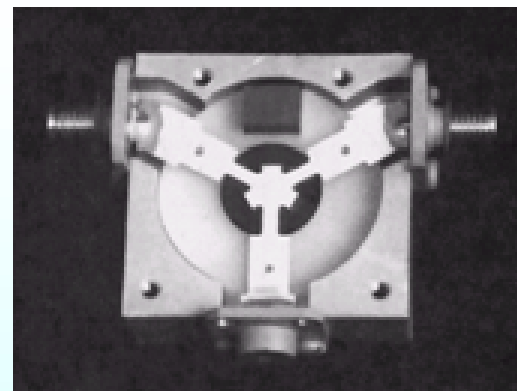
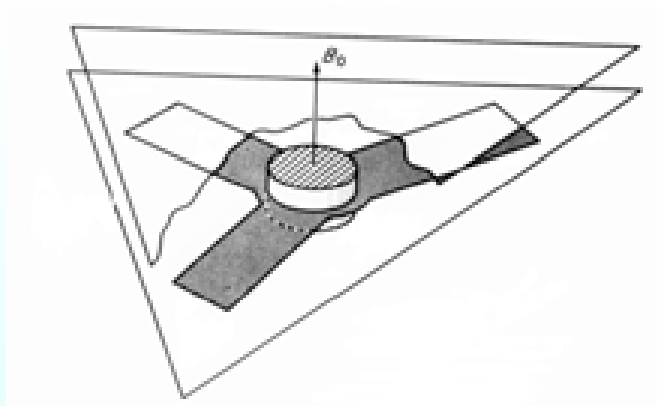


Паковања диода и транзистора



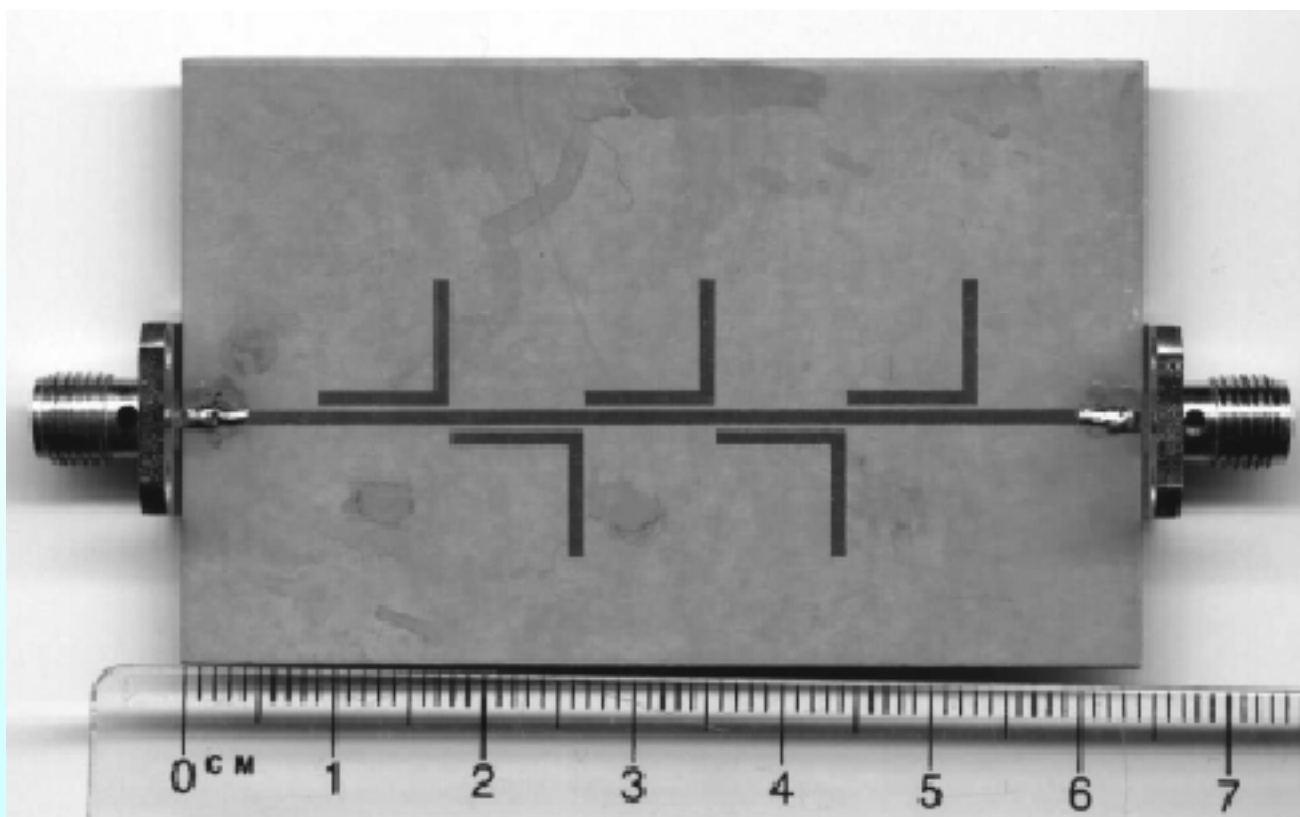


Склоп у техници тракастих водова



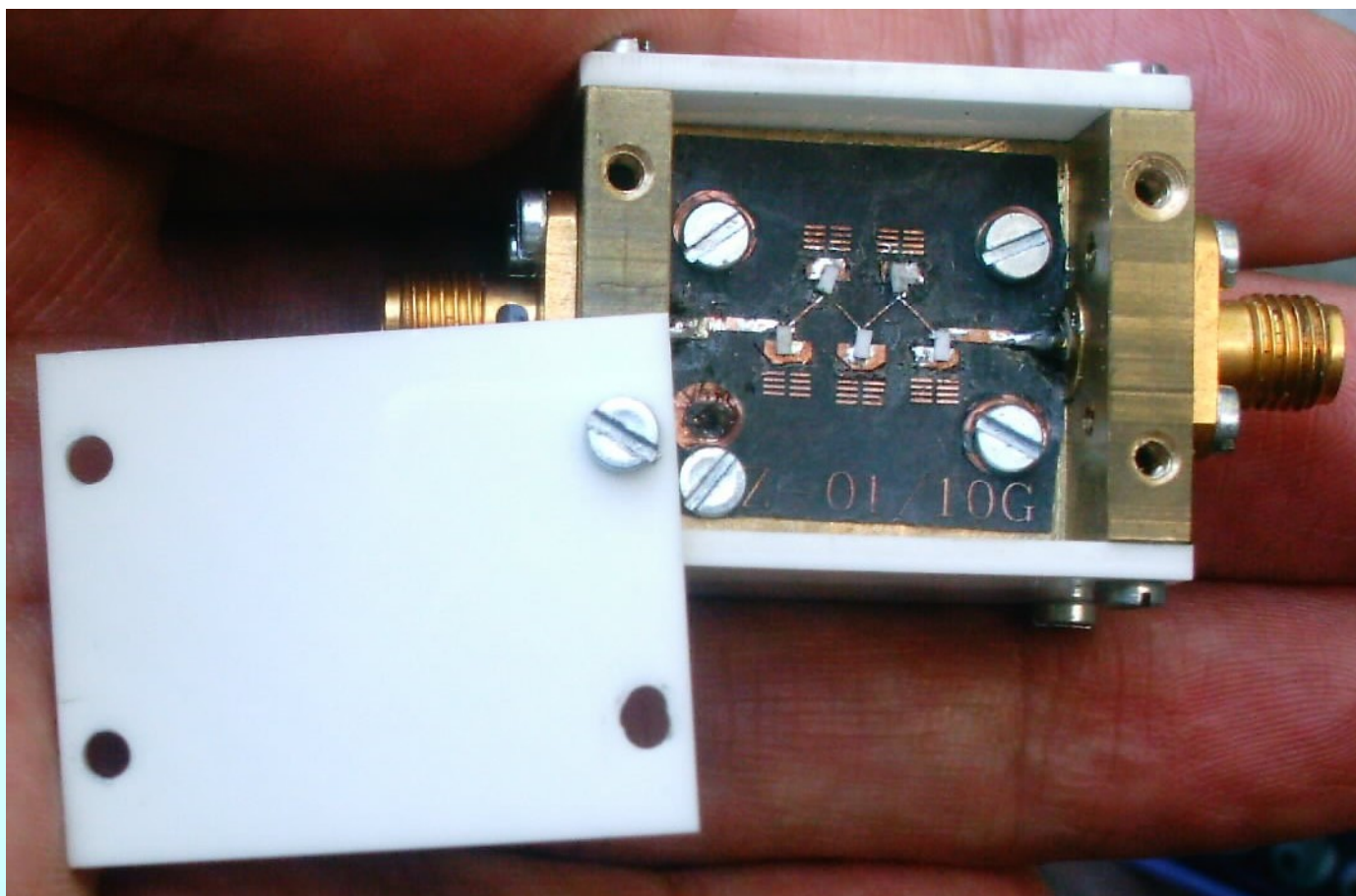


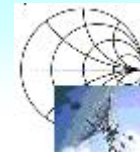
Склоп у микрострип техници



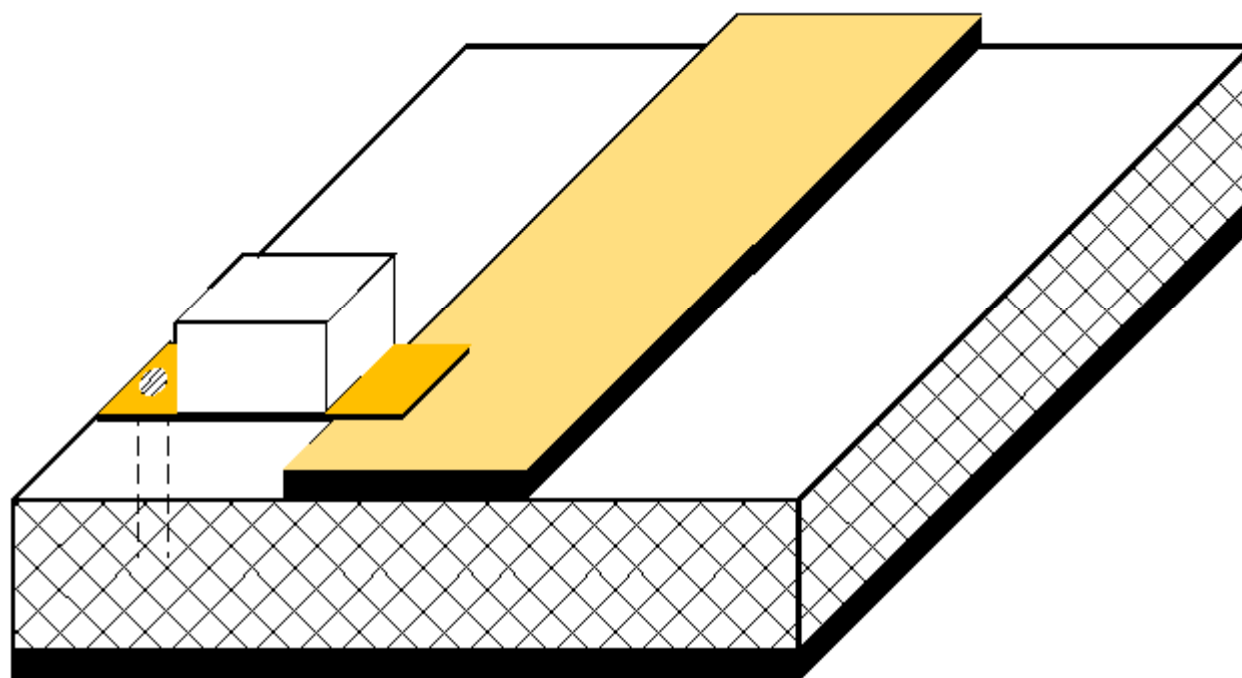


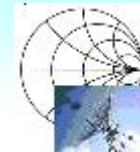
Склоп у микрострип техници



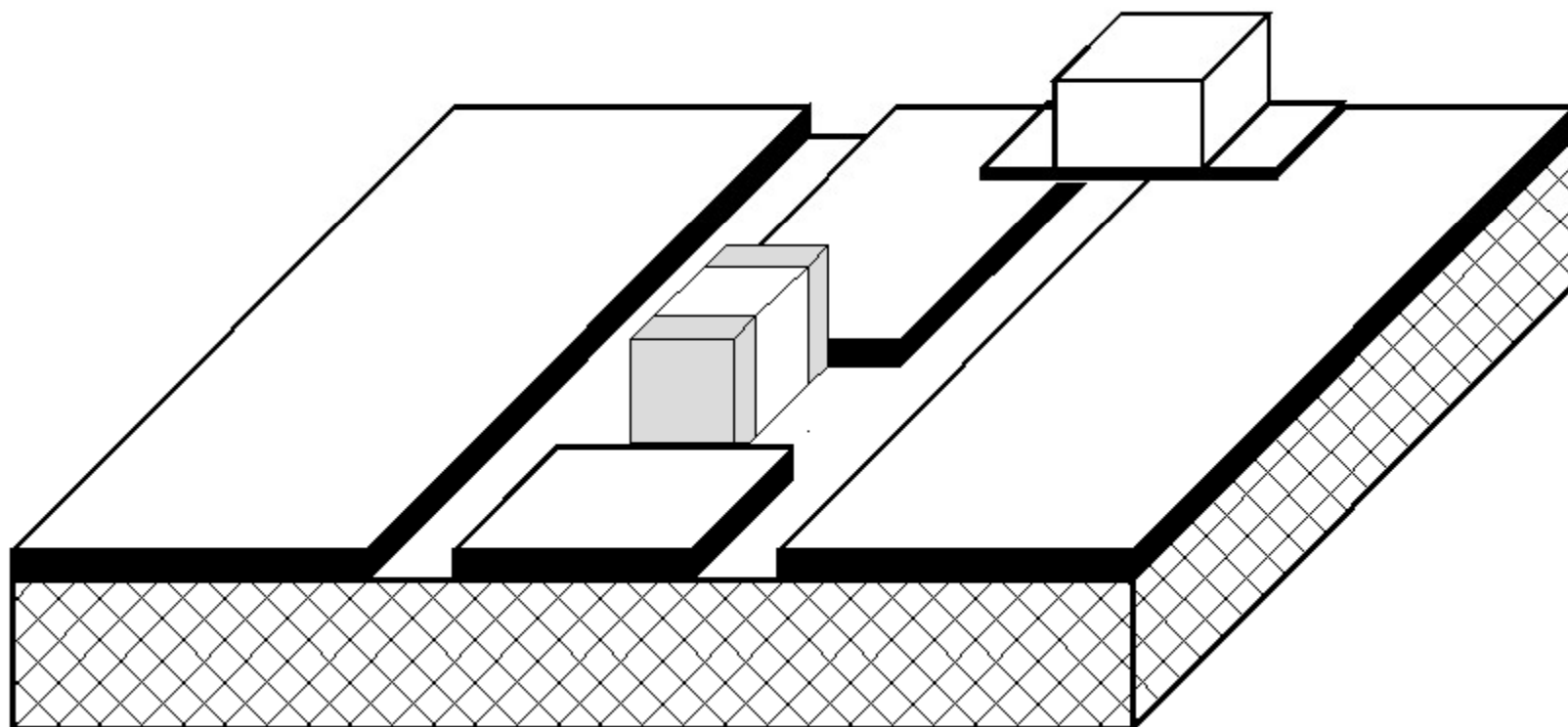


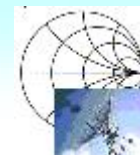
Паралелно монтирање



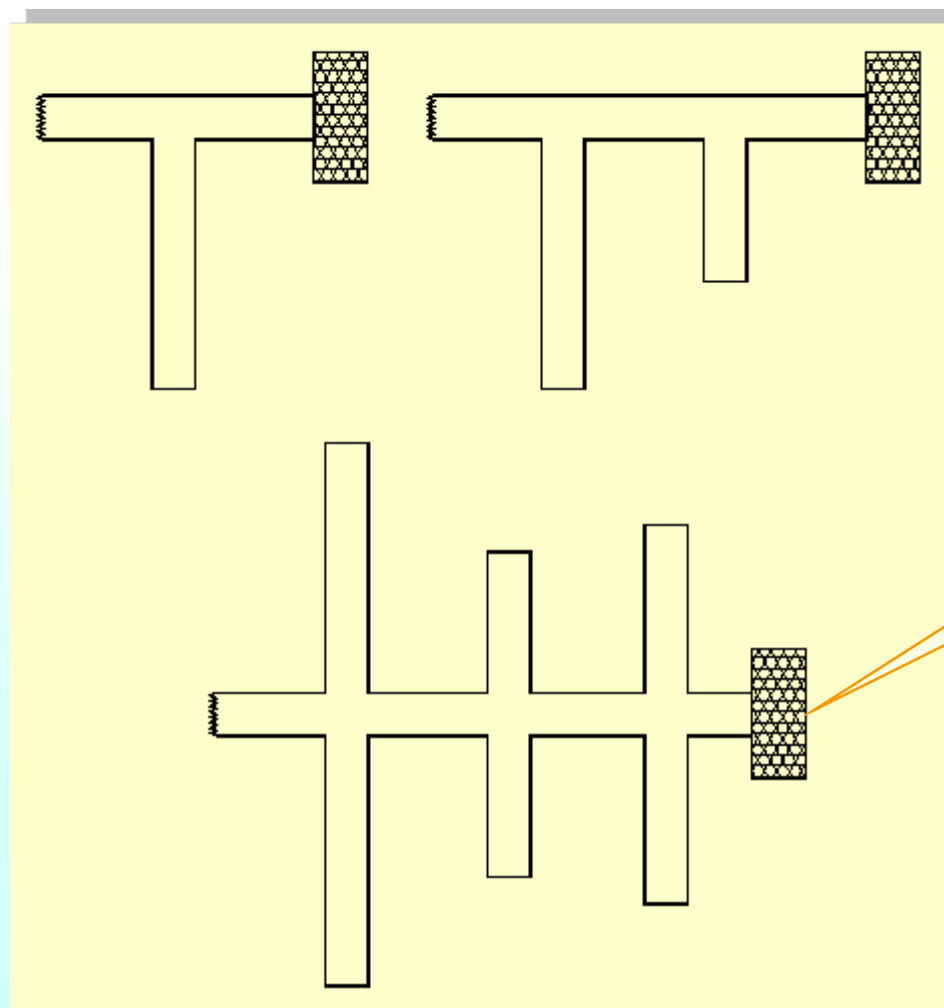


Монтирање елемената код копланарног таласовода

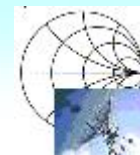




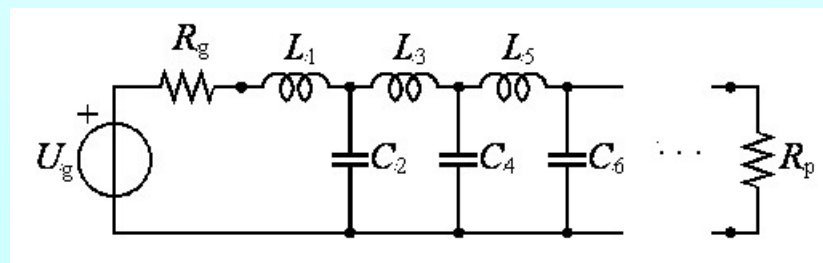
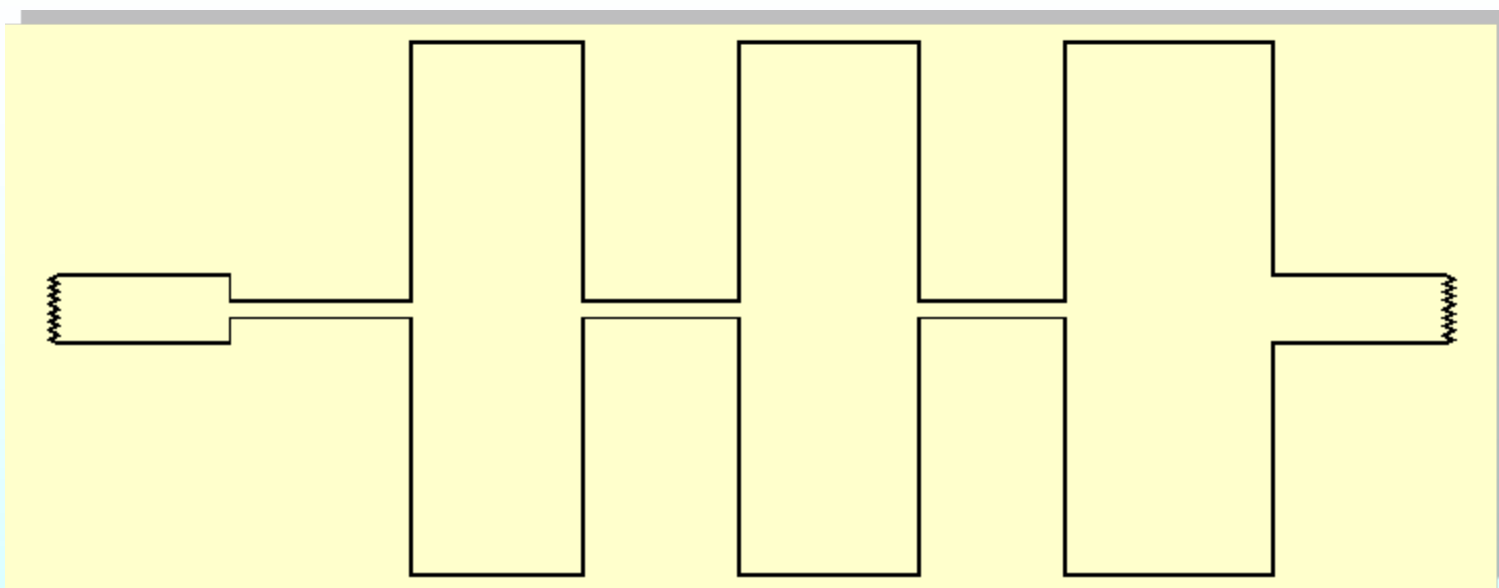
Кола за прилагођење

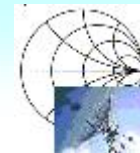


Потрошач

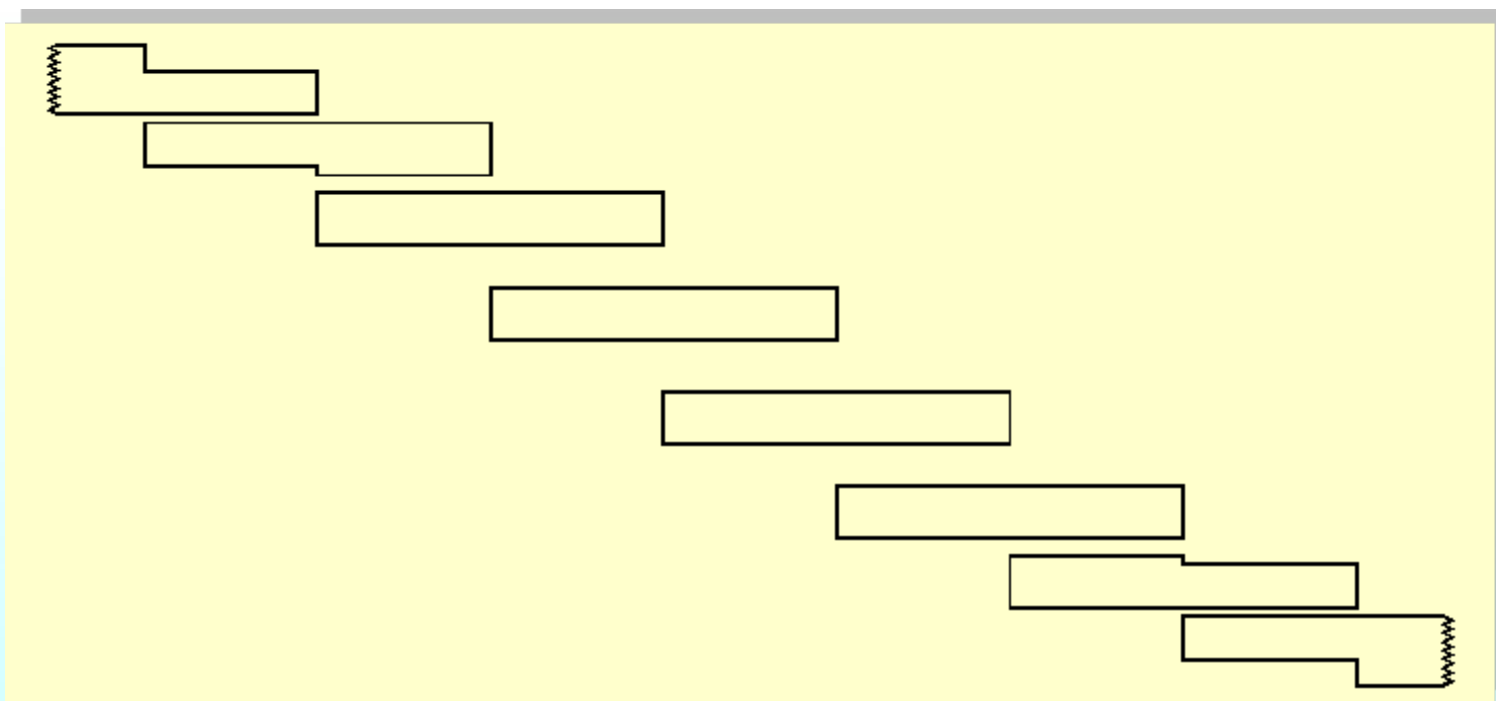


Нископропусни филтар





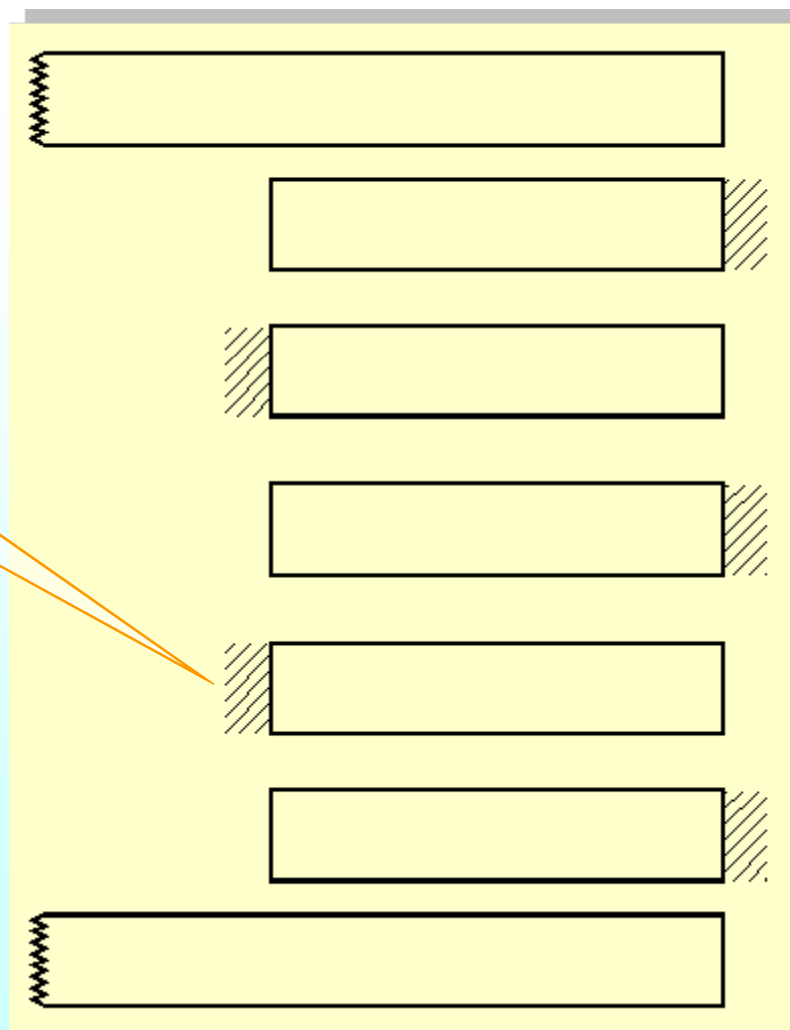
Филтар са спрегнутим резонаторима





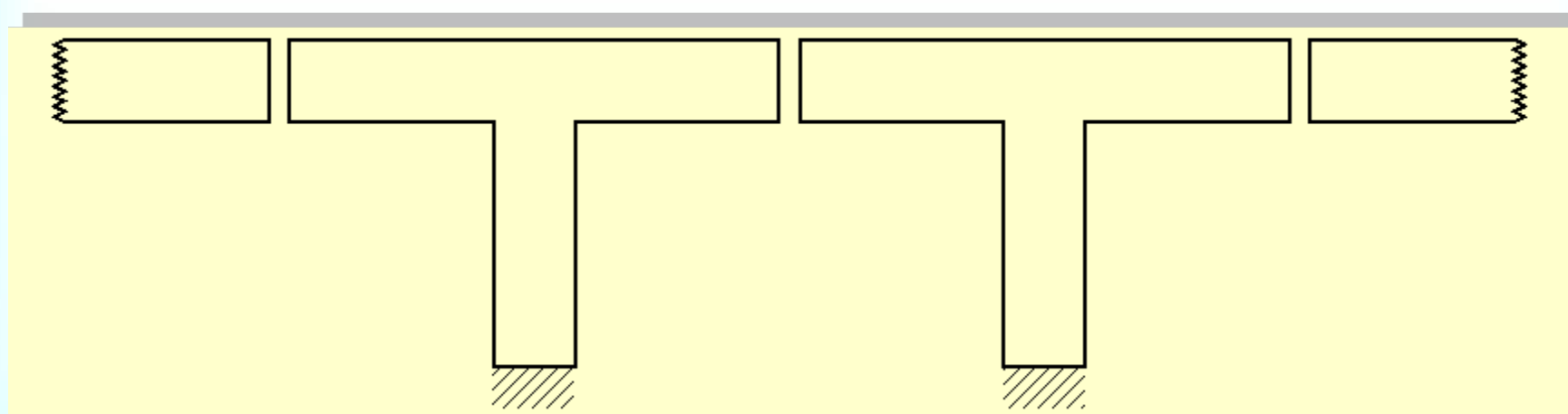
Интердигитални филтар

Кратак спој





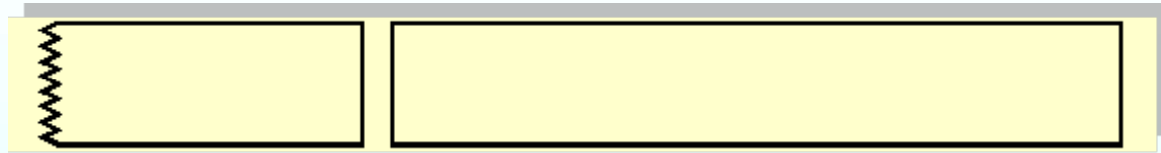
Високопропусни филтар



Кратак спој



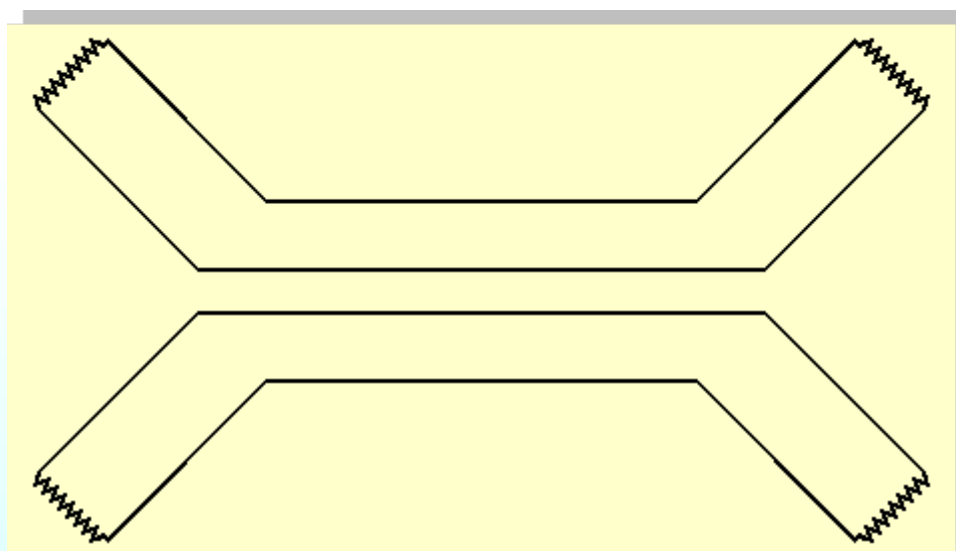
Спрега резонатора и вода



Полуталасни резонатор,
у виду отвореног вода,
који је капацитивно спрегнут
са напојним водом у

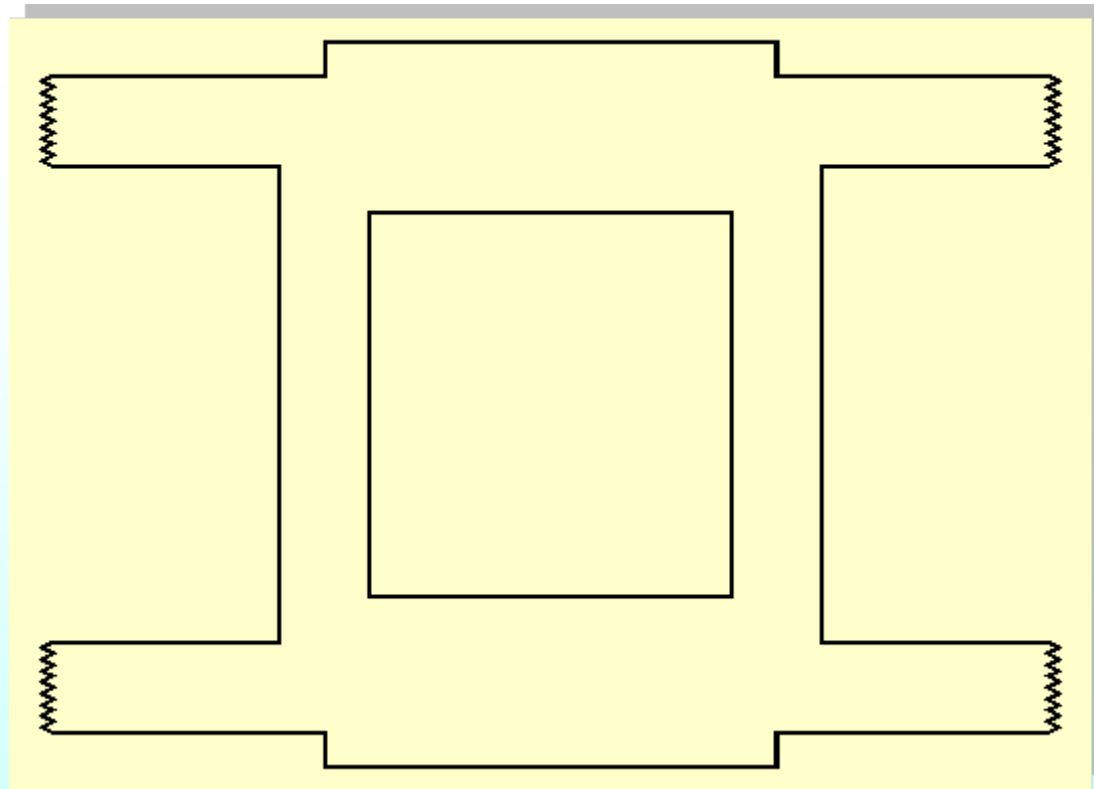


Усмерени спрежњак



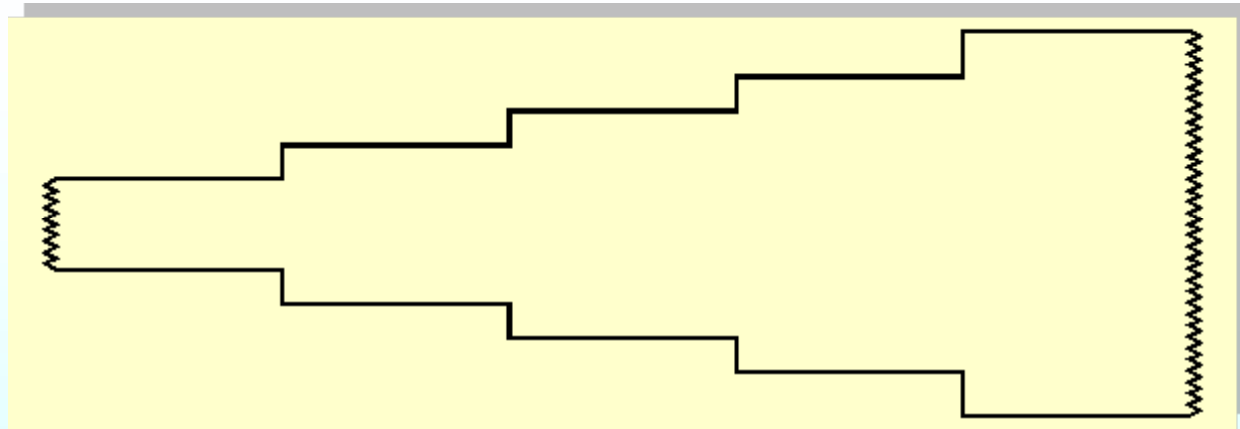


Усмерени спрежњак са огранцима



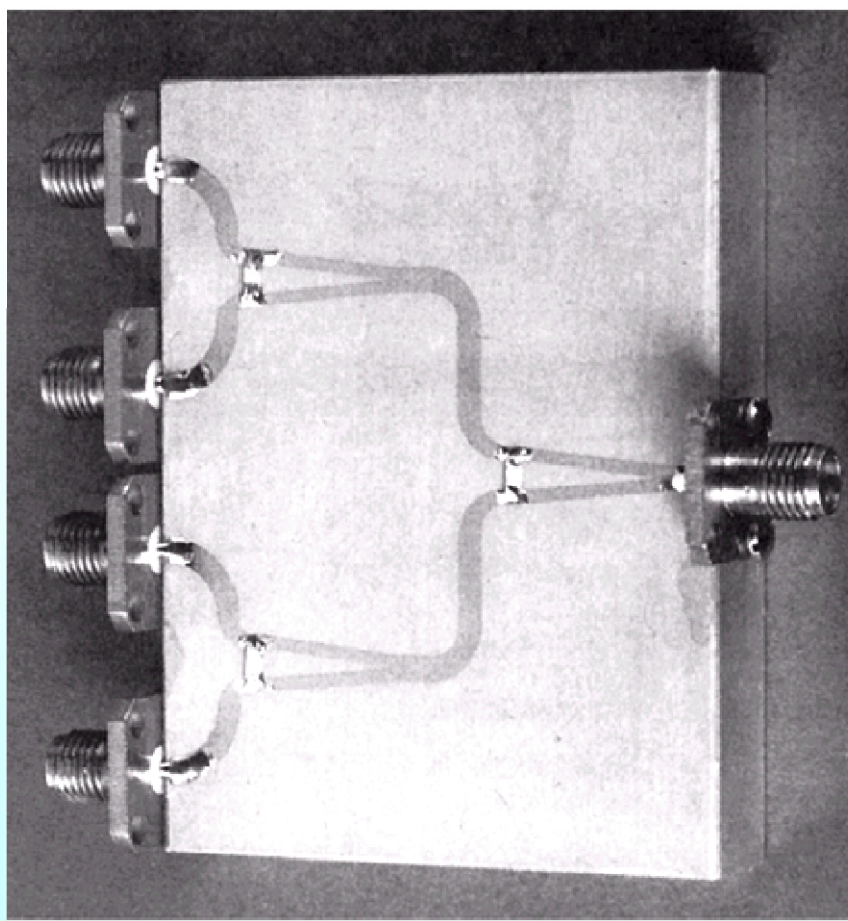


Трансформатор импедансе



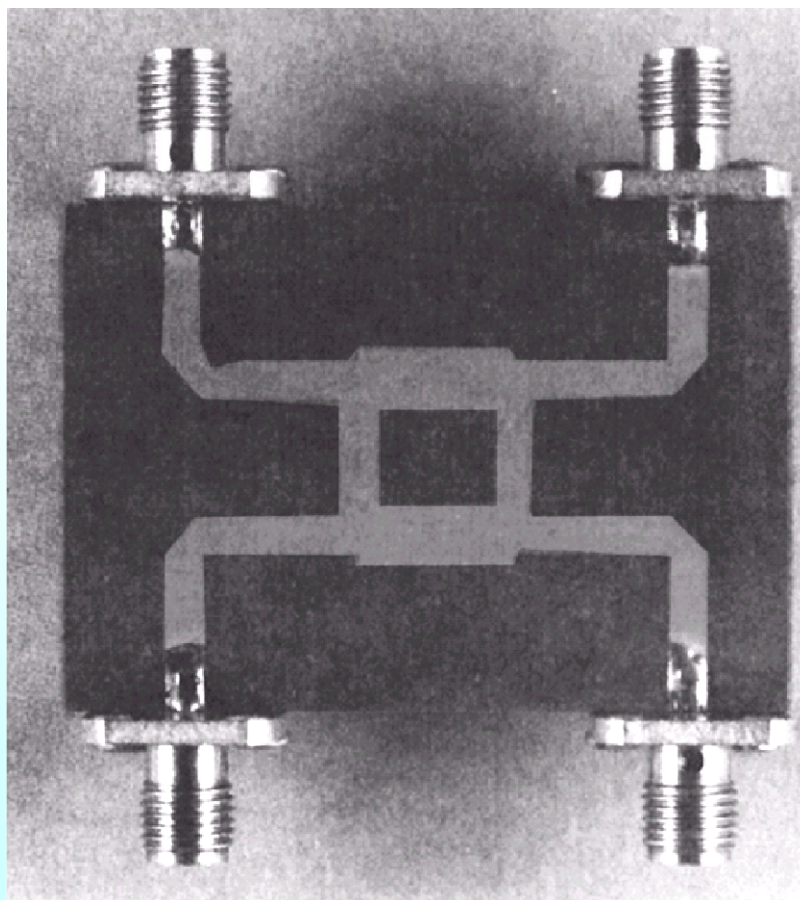


Микрострип склоп



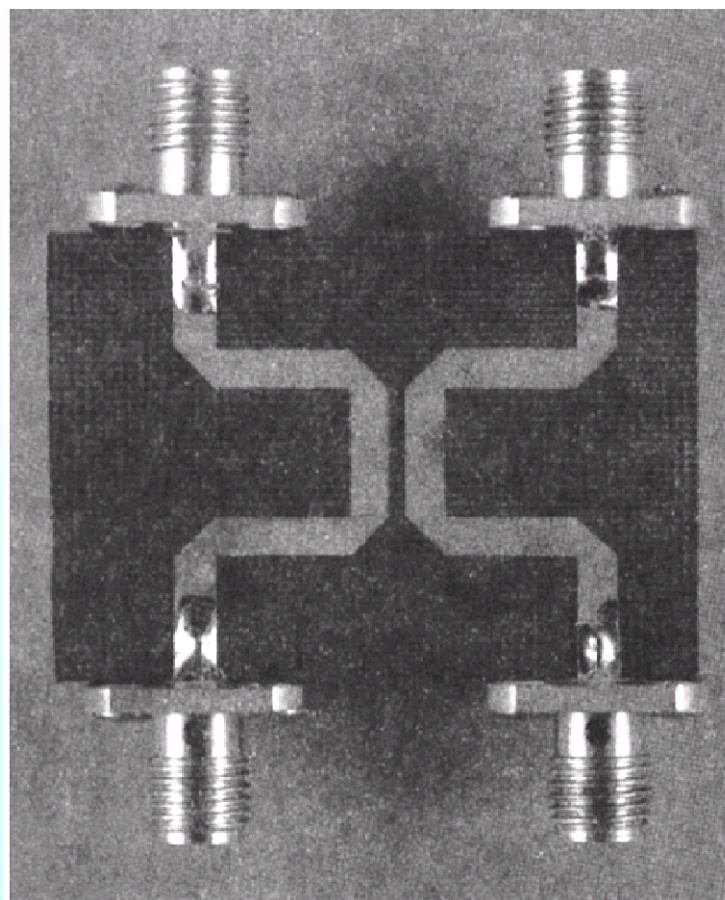


Микрострип склоп



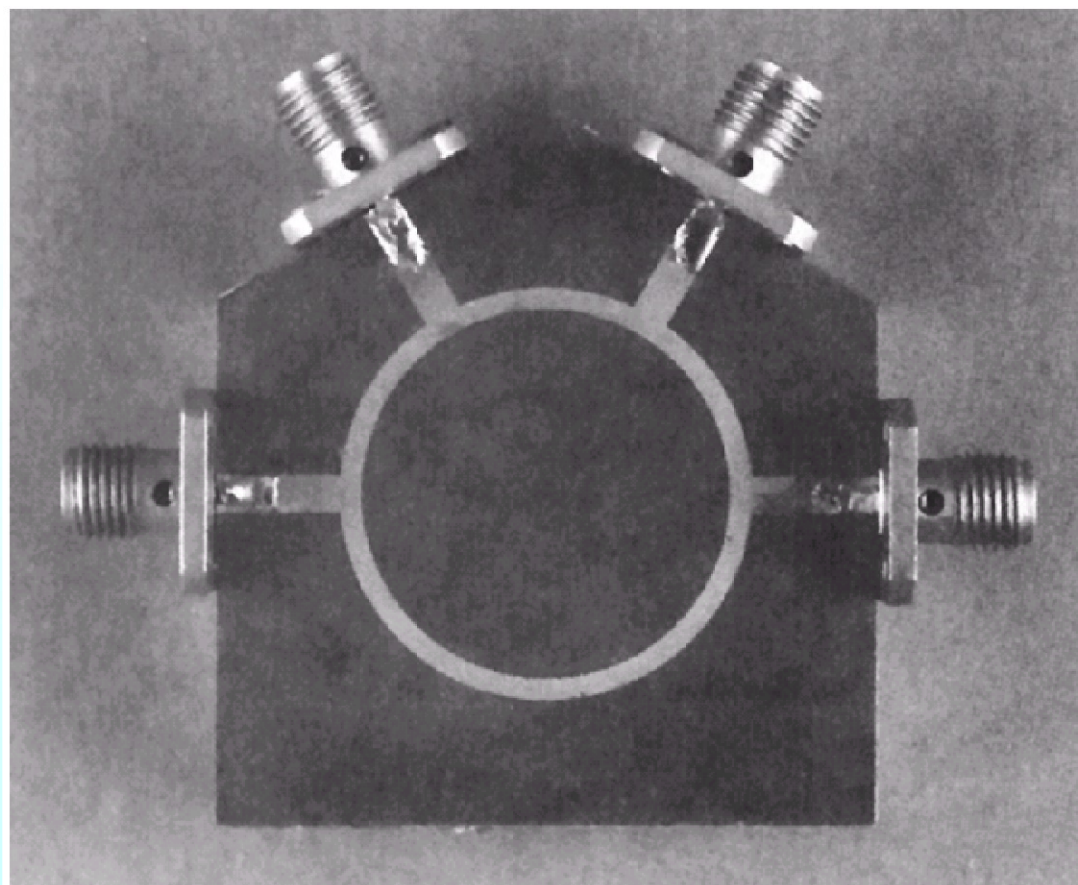


Микрострип склоп



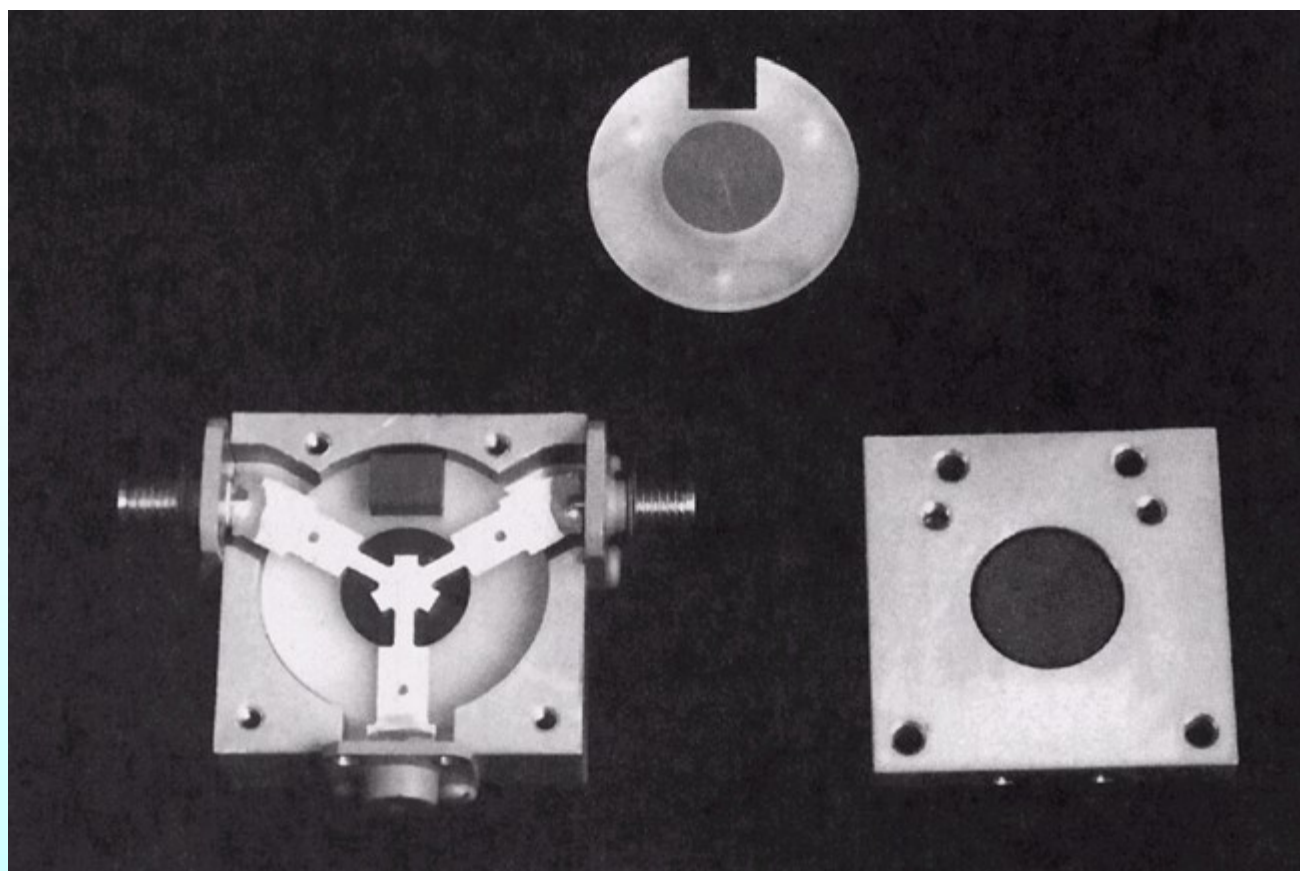


Микрострип склоп



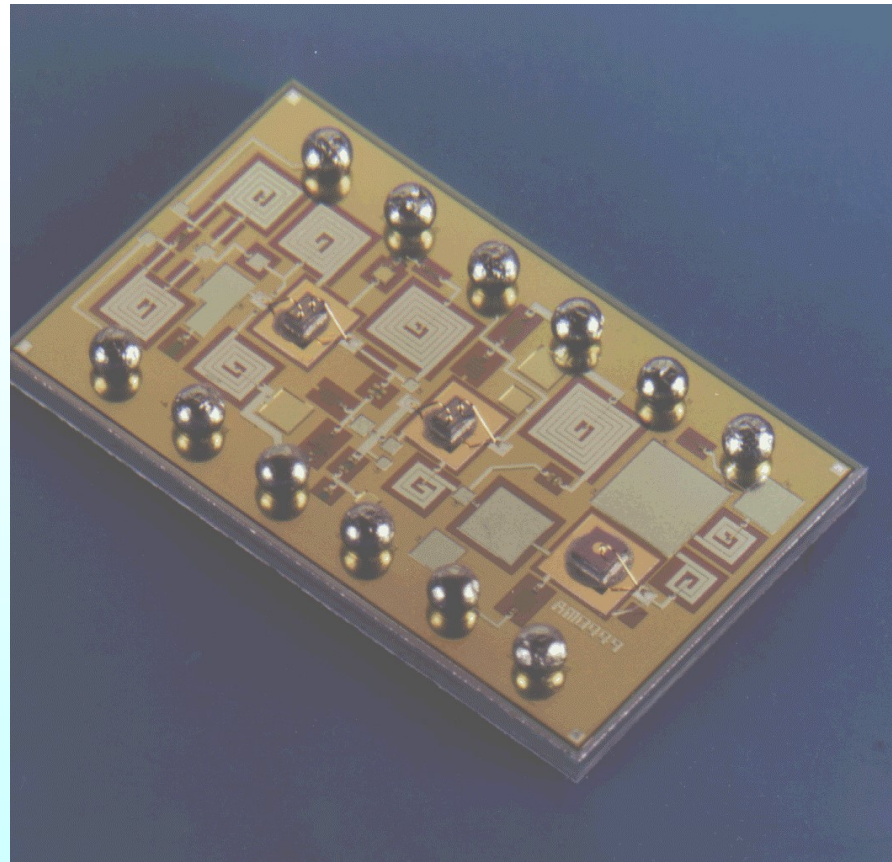


Склоп у техници тракастог вода





Пример микроталасног модула 2,45 GHz VCO (wireless LAN)





Microwave Integrated Circuit – MIC

- Пасивна кола са монтираним дискретним елементима се израде на једној штампаној плочици
- Плочица се смешта у оклоп, најчешће у облику металне кутијице са електрички и механички заптивеним поклопцем
- На кутијицу се монтирају конектори (најчешће SMA типа)



Monolithic Microwave Integrated Circuit – MMIC

- Пасивне компоненте се праве на истој подлози (полупроводнику) на којој се раде транзистори и диоде
- Проблем су губици у подлози
- Оваква кола се раде на подлогама од галијум-арсенида и сличних полупроводничких материјала

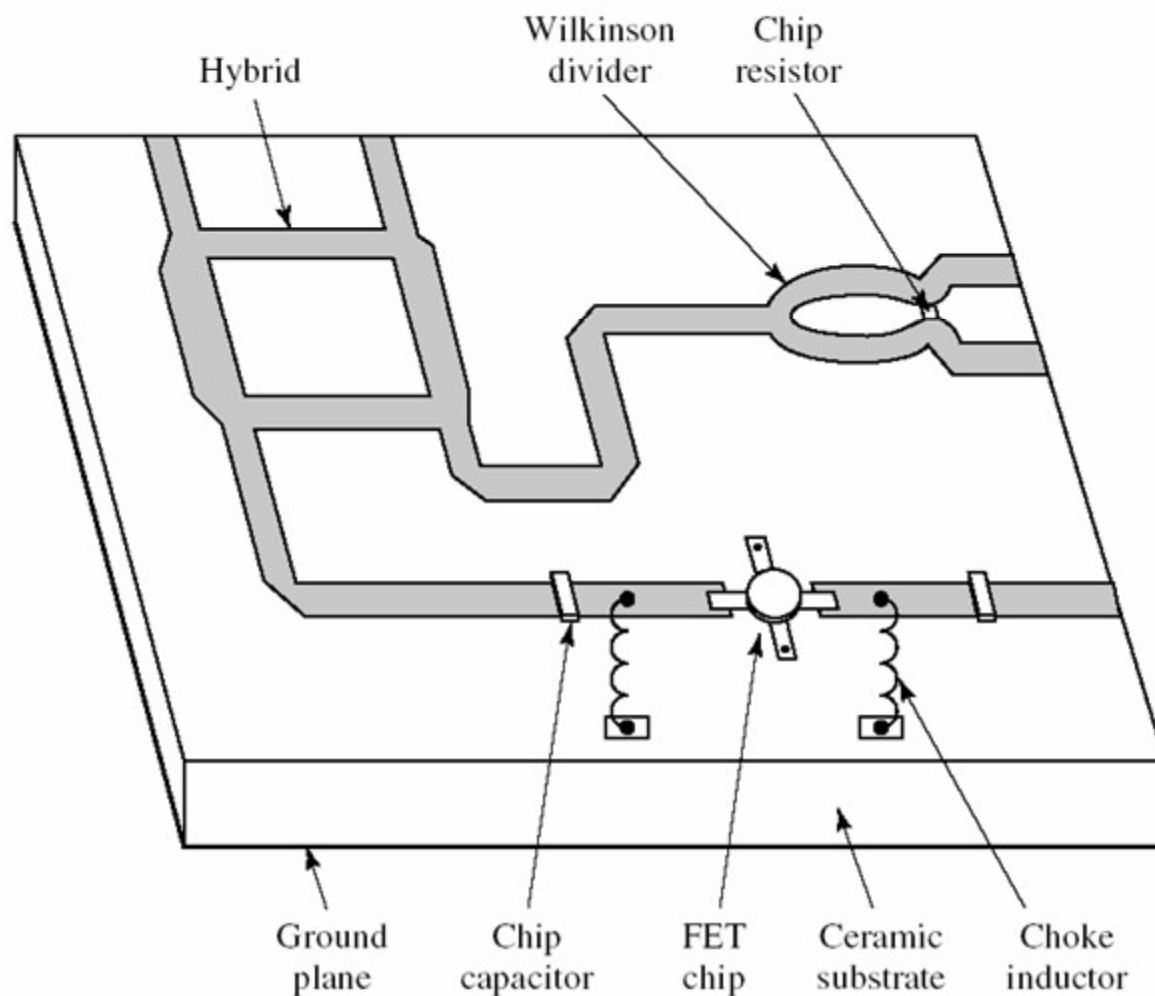


Квазимонолитна техника

- Пасивни део кола се прави на подлози од сафира
- Епитаксијалним растом се формира слој силицијума
- У њему се класичним поступцима израде полупроводничких компоненти образују активни елементи (**SOS** техника)

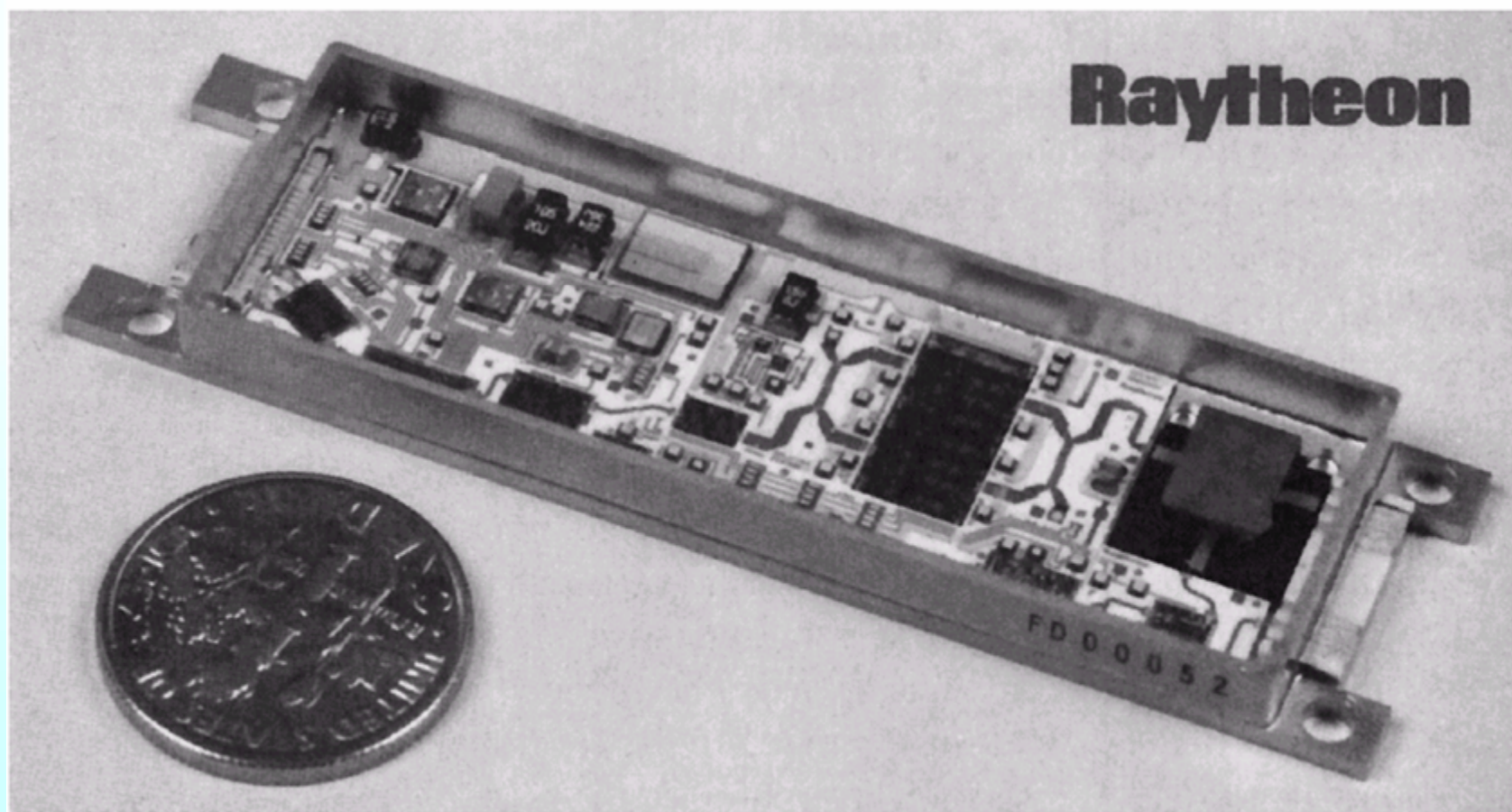


Хибридно интегрисано коло



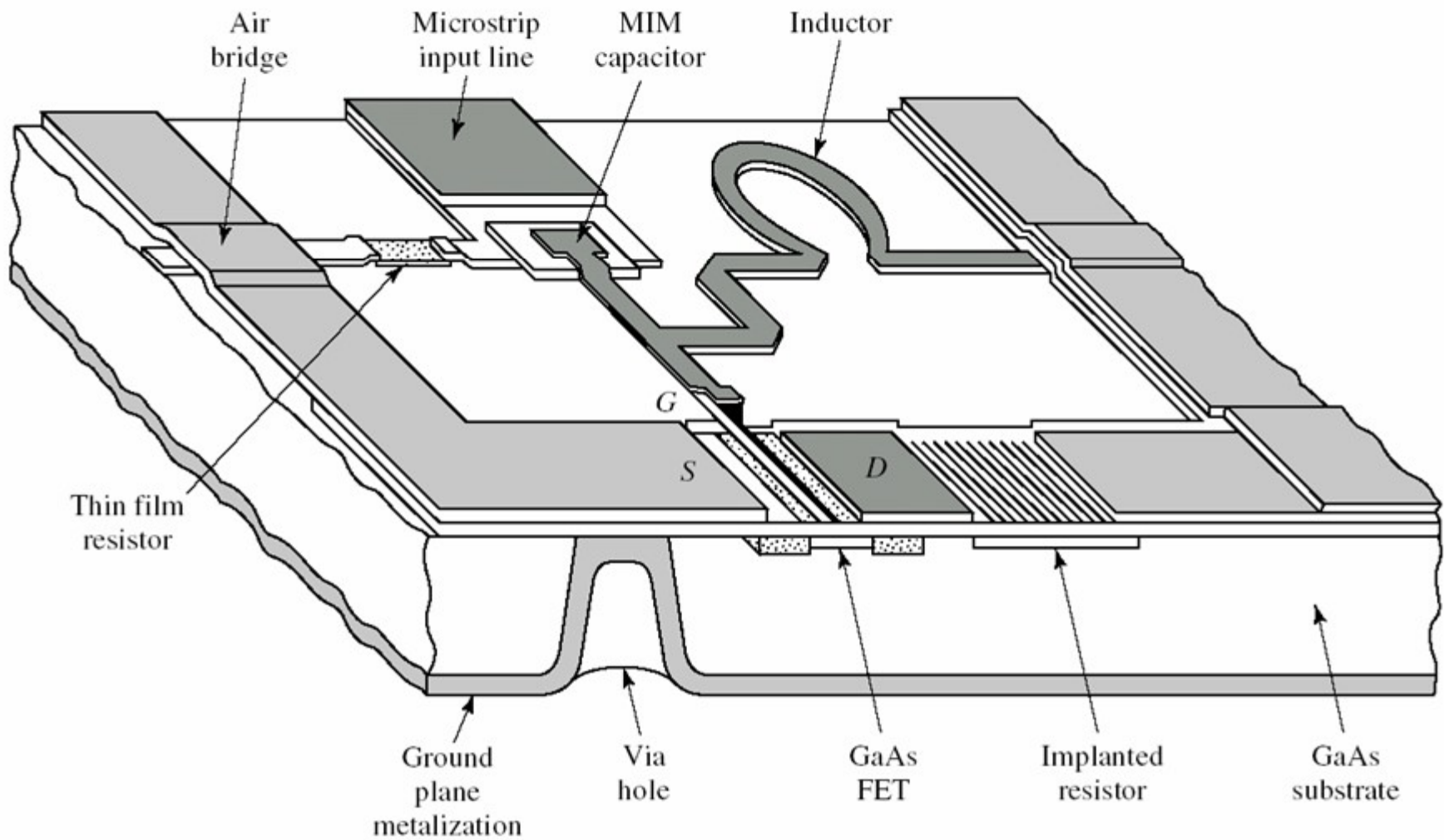


Хибридно интегрисано коло





MMIC





35 GHz microstrip radar receiver

