

Курс "Приложна електродинамика"

Планарни предавателни линии

Теми:

- ▲ Общи въпроси; "планарност"
- ▲ Микролентова линия
- ▲ Лентова линия
- ▲ Процепна линия; Finline
- ▲ Копланарен вълновод
- ▲ Свързани линии
- ▲ Технология
- ▲ TRL калкулатори
- ▲ Планарни резонатори
- ▲ Сравнение между планарните предавателни линии
- ▲ Приложимост в микровълновите интегрални схеми

Общи въпроси

- Типове вълни и вълнови модове в предавателните линии
[тип вълна]_{nm} - **TEM & qTEM**; **non-TEM (TE, TM, HE, EH)**

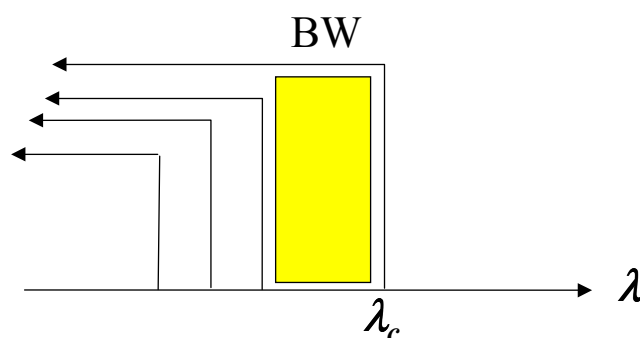
- Низши и висши модове

$$\lambda_g = \lambda / \sqrt{1 - \lambda^2 / \lambda_c^2}$$

λ_g – дължина на вълната във вълновода

$\lambda = \lambda_g / \sqrt{\epsilon_r}$ – дължина на вълната в среда с проницаемост ϵ_r

λ_c – критична дължина на вълната във вълновода



Общи въпроси (2)

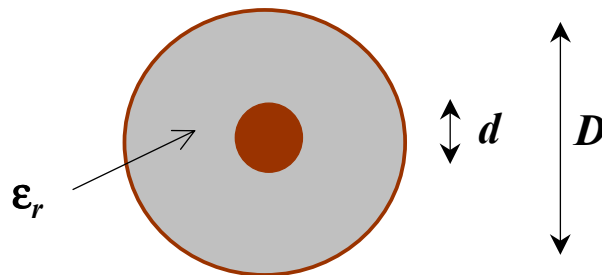
- Вълнов импеданс $Z = |E_{\perp} / H_{\perp}|$
- Характеристичен импеданс $Z_C = U/I = U^2/P = P/I^2$
- Пример (коаксиален вълновод):

$$Z_{TEM} = |E_r / H_{\phi}| = 120\pi / \sqrt{\epsilon_r} = 377 / \sqrt{\epsilon_r}$$

$$Z_C = (Z_{TEM} / 2\pi) \ln(D/d) = (60 / \sqrt{\epsilon_r}) \ln(D/d)$$

IEC стандарт

50 Ω



Общи въпроси (3)

- Предавана мощност:

$$P = \frac{1}{Z} \int_{S_{\perp}} |E_{\perp}|^2 ds_{\perp} = z \int_{S_{\perp}} |H_{\perp}|^2 ds_{\perp}$$

- Вълнова константа (фазово закъснение)

$$\beta = 2\pi / \lambda_g = 360 / \lambda_g, \text{ deg/cm}$$

- Константа на затихване (загуби)

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

$$\alpha = P_{losses} / 2P = \alpha_d + \alpha_m + \alpha_c + \alpha_r + \alpha_{mismatch} + \dots$$

Общи въпроси (4)

- Загуби в диелектрика α_d , dB/cm:

$$\alpha_d = \frac{2\pi \tan \delta_\epsilon}{\lambda_g Z_C} \left(\int_{S_\perp} |E|^2 ds \right) / 2P$$

- Загуби в проводниците α_C , dB/cm:

$$\alpha_C = \left(R_S \oint_{L_\perp} |H_\tau|^2 dl \right) / 2P$$

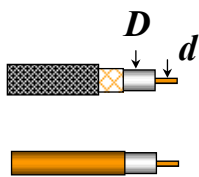
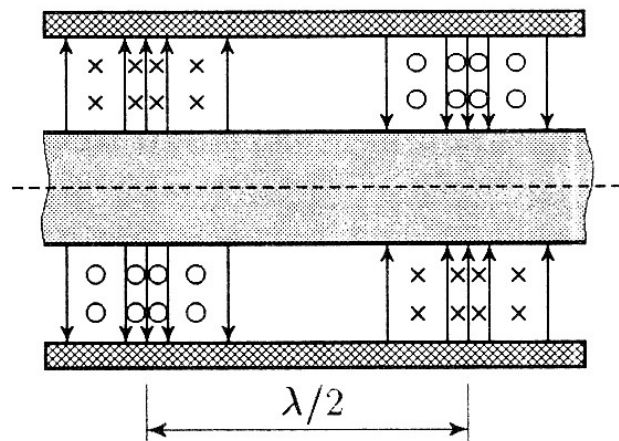
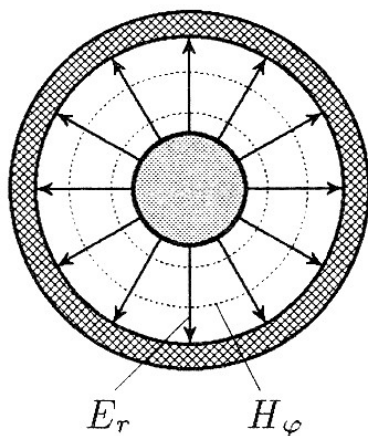
повърхнинен импеданс, $\Omega \cdot m^2$

$$R_S = 1 / \sigma \Delta$$

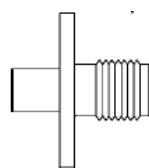
дълбочина на скин-слоя

$$\Delta = \sqrt{1 / \pi f \mu_r \mu_0 \sigma}$$

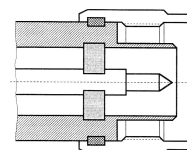
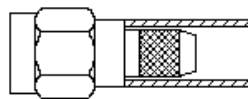
Коаксиален вълновод



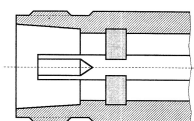
**RF
кабели**



Съединители SMA



N-male



N-female

Коаксиален вълновод (2)

- Загуби в диелектрика α_d , dB/cm:

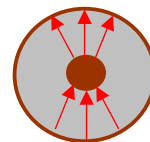
$$\alpha_d = \frac{27.3}{\lambda_0} \tan \delta_\epsilon$$

- Загуби в проводниците α_c , dB/cm (за Cu):

$$\alpha_c = \frac{1.38 R_s}{Z_c} \times \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right)$$

- Гранична честота на използване f_c , GHz:

$$f_c, \text{GHz} = \frac{19.1}{\sqrt{\epsilon_r} (D+d), \text{cm}}$$



H_{11}
МОД

Коаксиален вълновод (3)

- Импеданс Z_c , Ω :

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left[\frac{D}{d} \right]$$

D = const

(за въздух)

при $D/d \sim 3.6$: $\alpha_c \Rightarrow \min$

$Z_c \sim 77 \Omega$

при $D/d \sim 1.65$: $P \Rightarrow \max$

$Z_c \sim 30 \Omega$

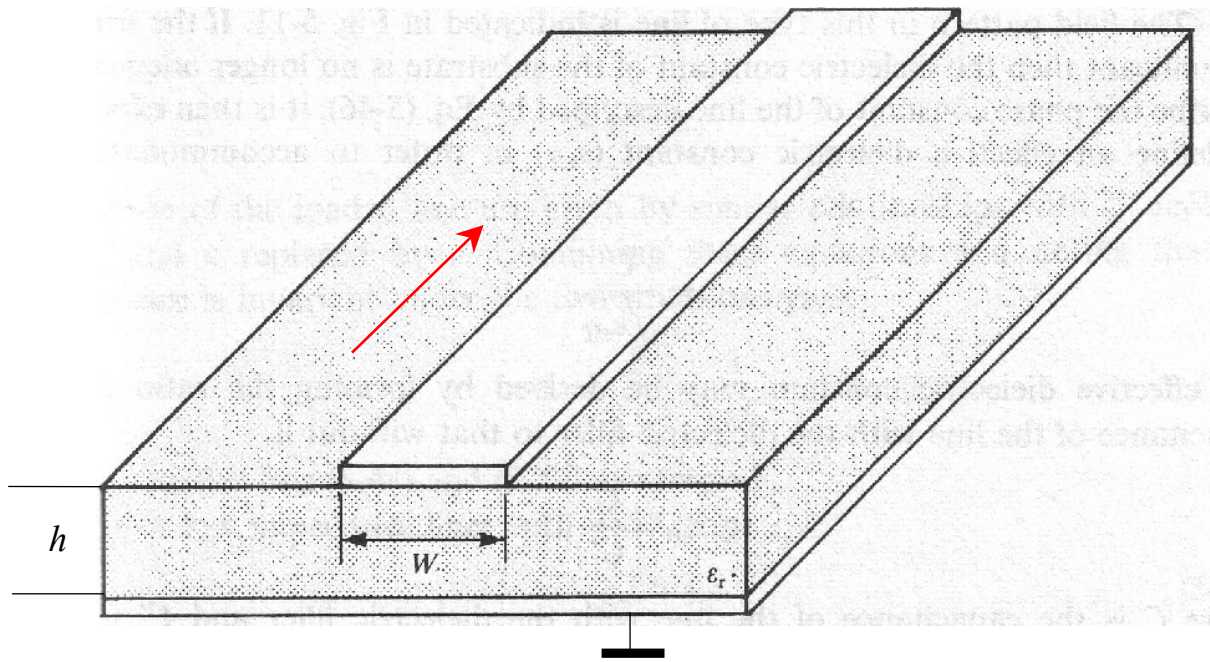
при $D/d \sim 2.72$: $U_{th} \Rightarrow \min$

$Z_c \sim 60 \Omega$

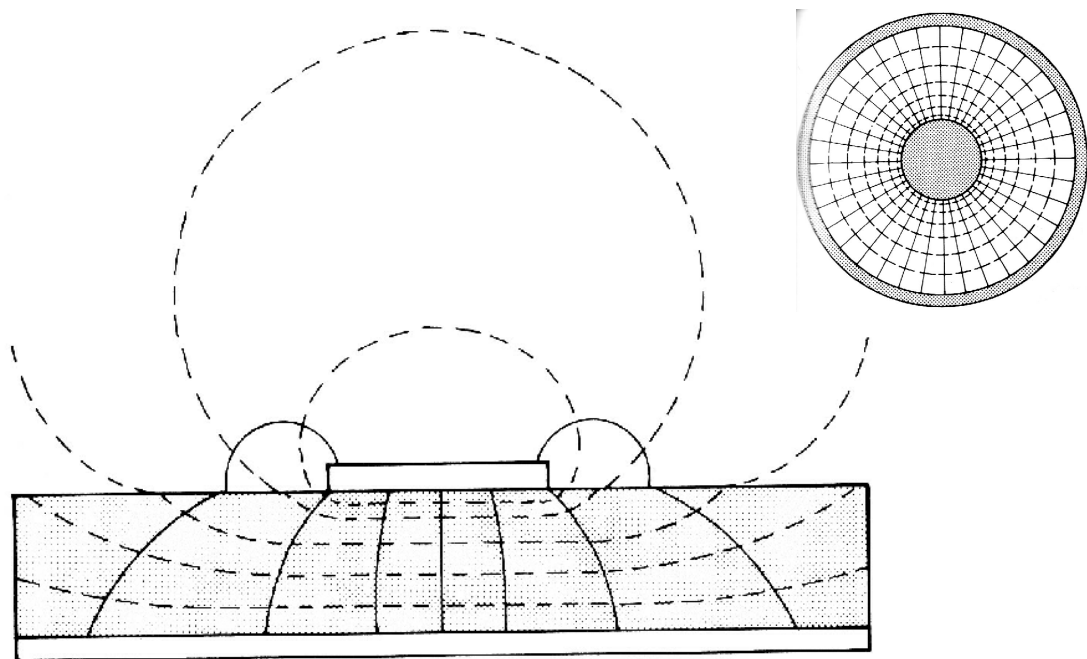
$Z_c = 50 \Omega$ (IEC standards) - компромис от трите случая!

$Z_c = 75 \Omega$ (tv) min загуби от Yagi-Uda антена

Микроленточная линия

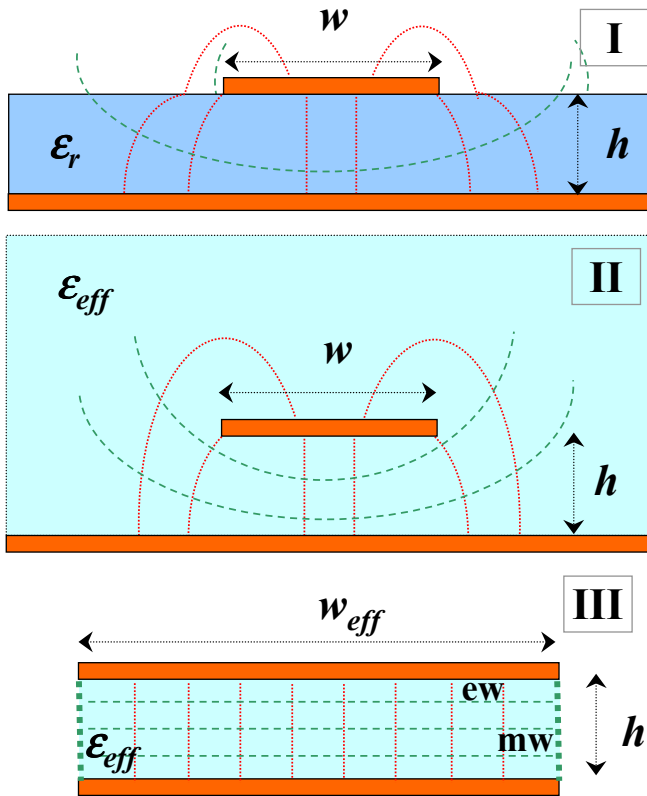


Микроленточная линия (2)



- Electric field
- - - Magnetic field

Микролентова линия (3 - планарен еквивалент)

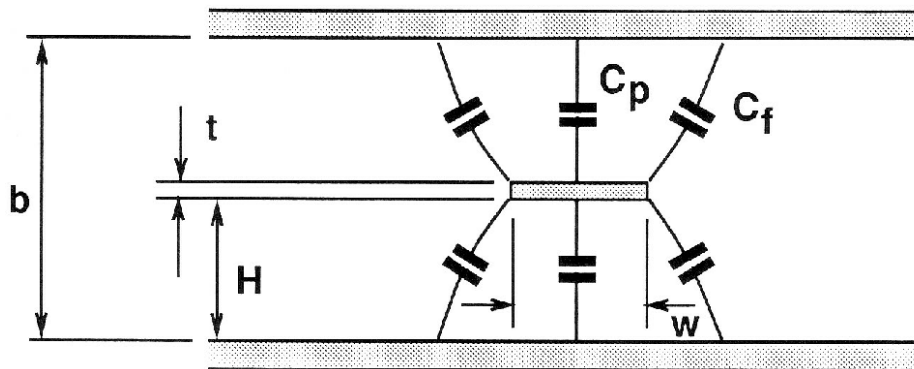


I Реална микролентова линия **ТЕМ** мод

II Микролентова линия с ефективна диелектрична проницаемост ϵ_{eff}

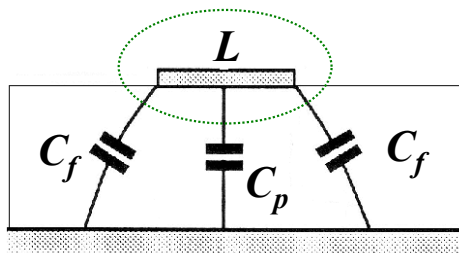
III Планарен еквивалент на микролентова линия с ефективни параметри ϵ_{eff} и w_{eff}

Микролентова линия (4 - ефективни параметри)



Лентова линия

Микролентова линия



$$C(\epsilon_r) = C_0(\epsilon_r) + 2C_f(\epsilon_r)$$

$$C_a(1) = C_0(1) + 2C_f(1);$$

$$L(\epsilon_r) = L(1)$$

$$\epsilon_{eff} = C(\epsilon_r)/C_a(1)$$

$$Z_C = 1/c\sqrt{C(\epsilon_r) \cdot C_a(1)}$$

Микролентова линия (5)

Формули за ефективните параметри на микролентовата линия:

- ефективна диелектрична проникваемост на средата $\epsilon_{eff}(f=0)$:

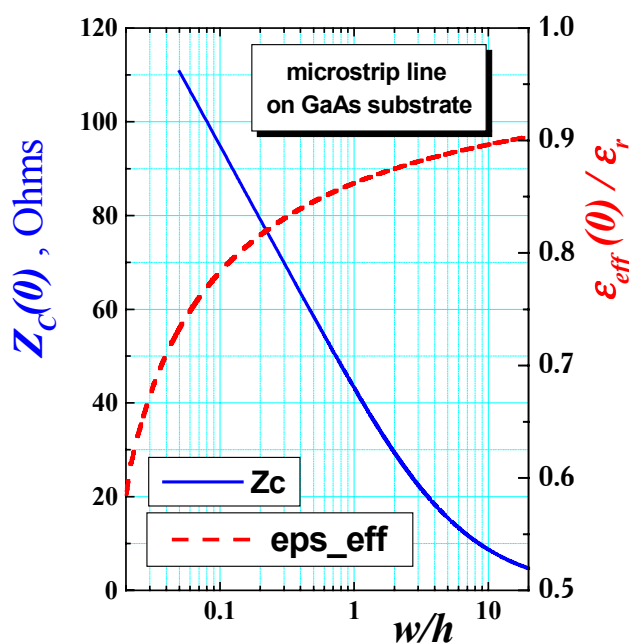
$$\epsilon_{eff}(0) = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{w/h} \right)^{-1/2}$$

- характеристичен импеданс $Z_C(f=0)$:

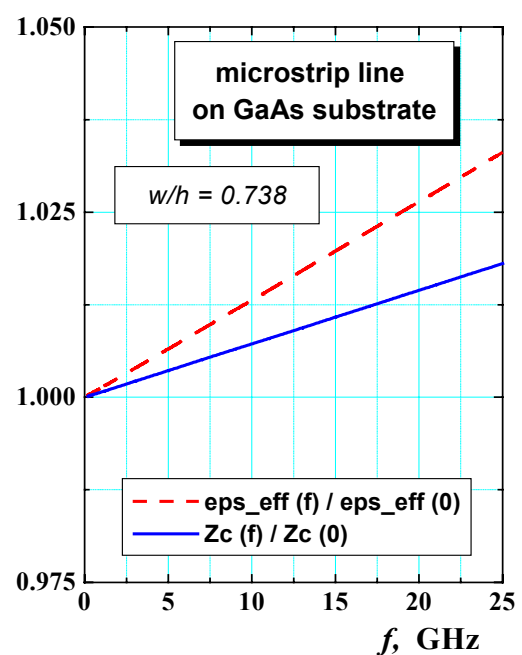
$$Z_C(0) = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left[\frac{f(w/h)}{w/h} + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{w/h} \right)^2} \right],$$

$$f(w/h) = 6 + (2\pi - 6) \exp \left[- \left(\frac{30.666}{w/h} \right)^{0.7528} \right]$$

Микролентова линия (6)

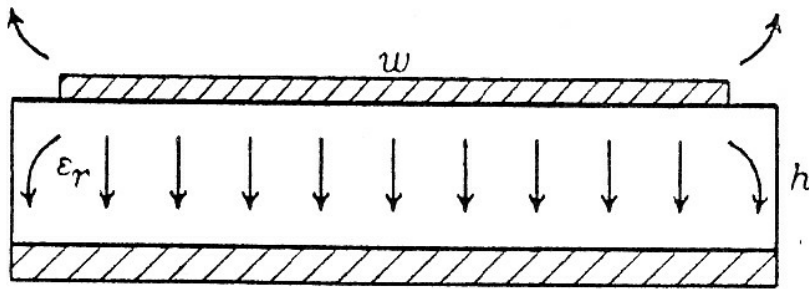


Зависимост от w/h



Честотна дисперсия

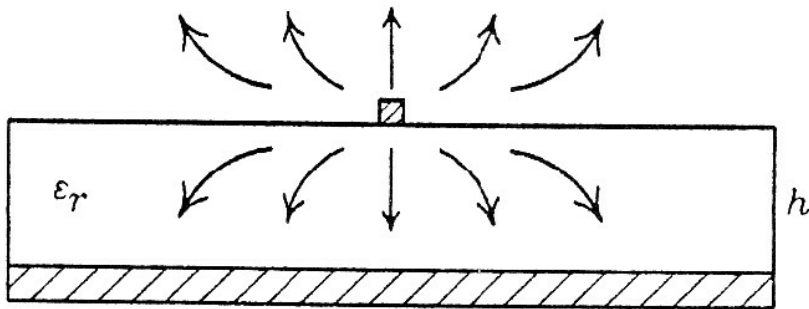
Микролентова линия (7)



Широка линия:

$\epsilon_{eff}/\epsilon_r$ - расте;

Z_C - намалява



Тясна линия:

$\epsilon_{eff}/\epsilon_r$ - намалява;

Z_C - расте

Микролентова линия (8 - общи загуби)

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_C$$

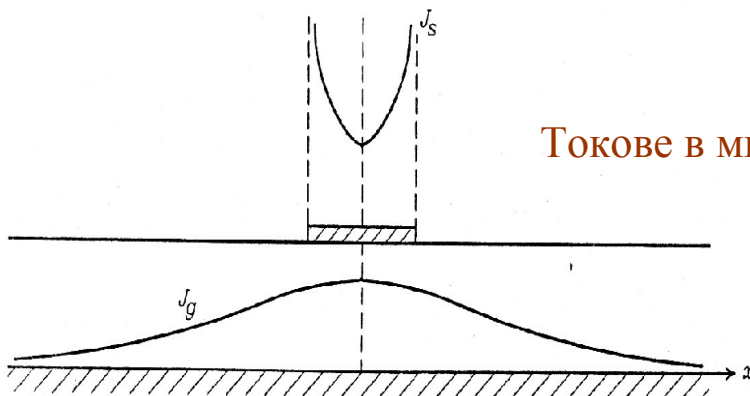
dB/cm

$$\alpha_d = \frac{27.3}{\lambda_g} \operatorname{tg} \delta_\epsilon \left(\frac{\epsilon_{eff} \epsilon_r - \epsilon_r}{\epsilon_{eff} \epsilon_r - \epsilon_{eff}} \right)$$

диелектрични

$$\alpha_C = 1.38 \frac{R_S}{Z_C h} \left[1 - \left(\frac{w'}{4h} \right) \right] \times \left[1 + \frac{h}{w'} + \frac{h}{\pi w'} \left(\ln \frac{2h}{\tau} - \frac{\tau}{h} \right) \right], \quad w' = \frac{\tau}{\pi} \left(\ln \frac{2h}{\tau} + 1 \right),$$

в микролентовия проводник



Токове в микролентовата линия

Микролентова линия (9 - честотни ограничения)

$$f_c, \text{GHz} = \frac{300}{\sqrt{\epsilon_r} (2w + 0.8h), \text{mm}}$$

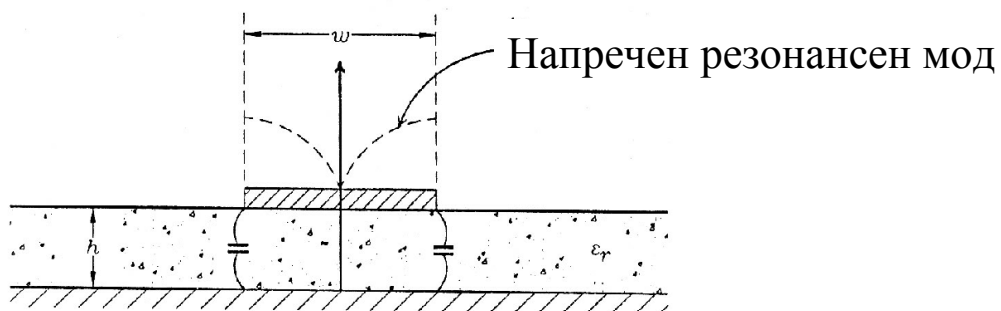
Емпирична
критична честота

Поява на висши паразитни модове:

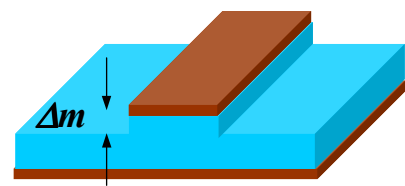
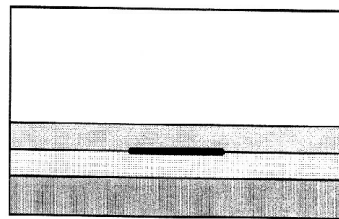
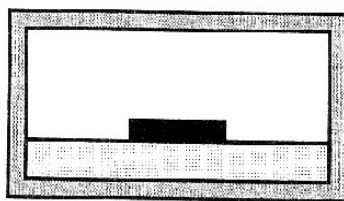
а) повърхнинни вълни (за дебели подложки; $\nu_{TEM} \sim \nu_S$);

б) напречни резонансни модове (за широки подложки

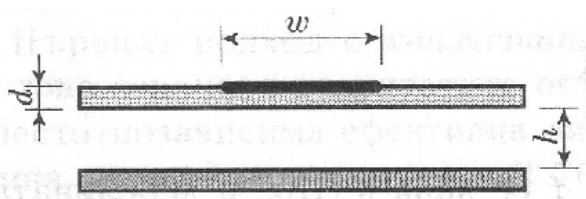
$$\lambda_g / 2 = w + 0.4 h)$$



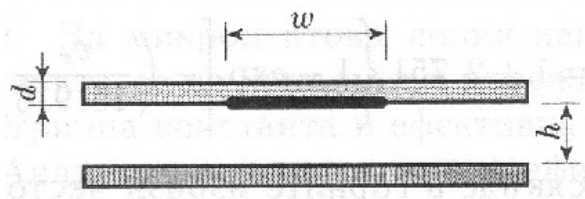
Микролентова линия (10 - други подобни линии)



Екранирани, многослойни, вкопани, гравирани и пр.

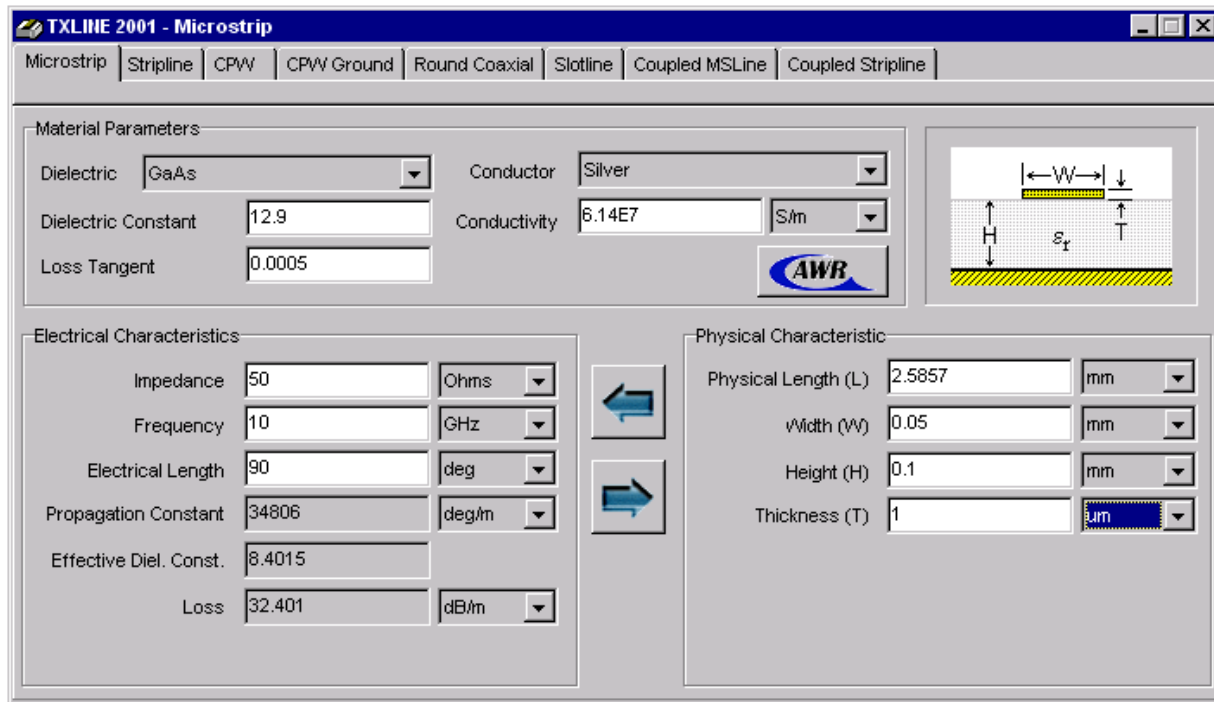


Окачена микролентова
линия



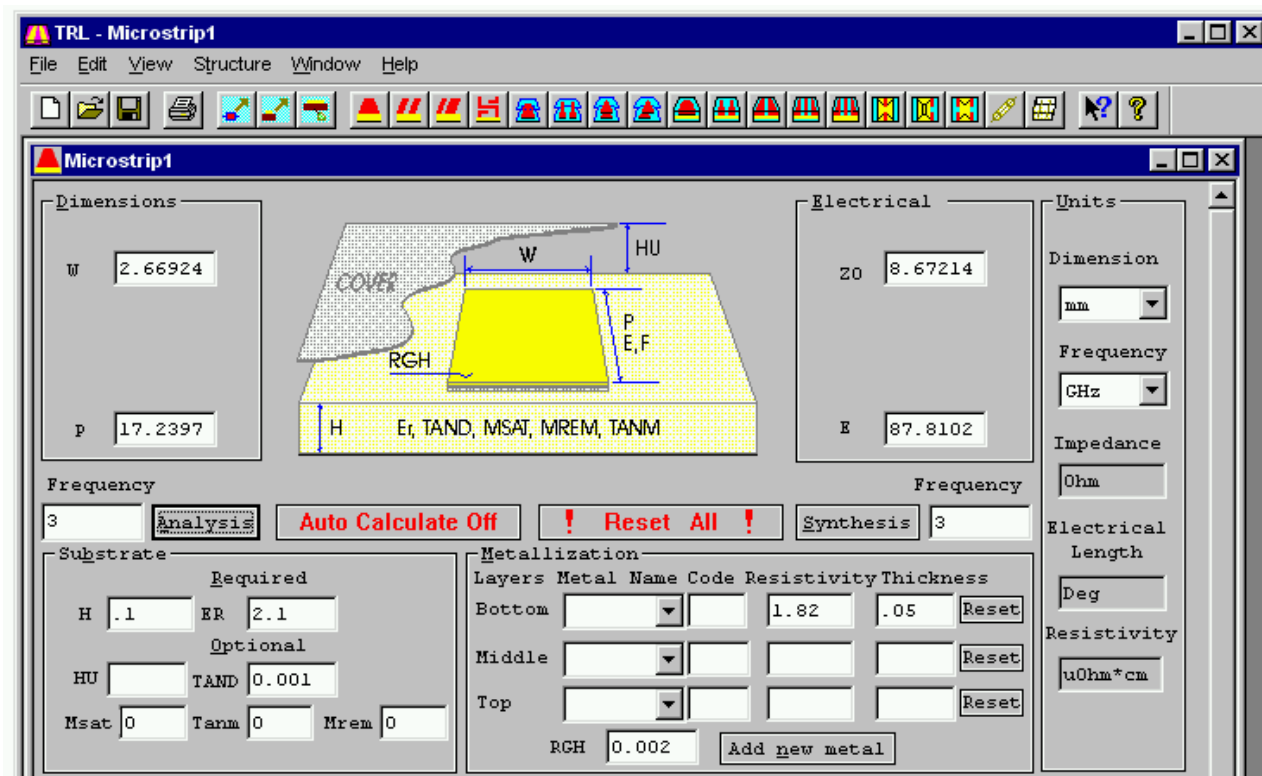
Обърната микролентова
линия

Микролентова линия (11 - TRL калкулатори)



TxLine калкулатор

Микролентова линия (10 - TRL калкулатори)



TRL калкулатор

Микролентова линия (13 - TRL калкулатори)

Microstrip

Calculate Z0 [F4]

Z0 = 80.42 Ω

Elect Length = 0.085 λ

Elect Length = 30.5 degrees

1.0 Wavelength = 11802.853 mil

Vp = 1.000 fraction of c

εeff = 1.000

WH = 2.000

Dielectric: εr = 1

Free Space

Frequency: 1 GHz

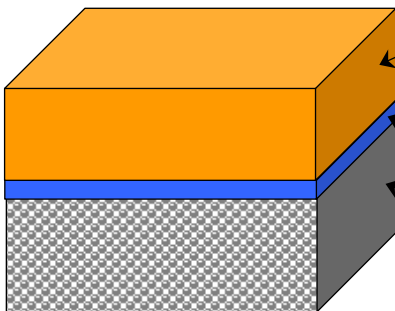
Length Units: mils

Normal [Click for Web: APPLICATION NOTES - MODELS - DESIGN TIPS - DATA SHEETS - S-PARAMETERS](#)

Agilent AppCAD калкулатор

Технология на микролентови структури

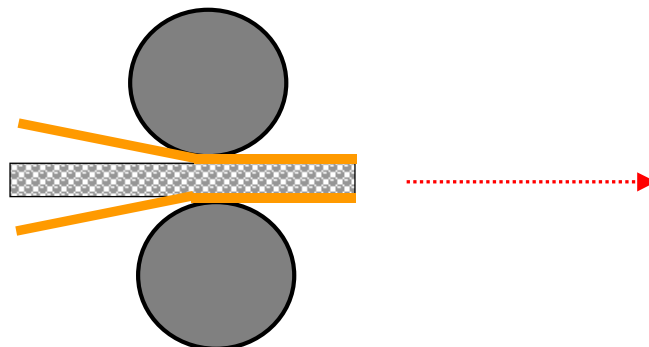
1. Съвременни меки подложки



Дебела Си-метализация ~ 17.5 μm, 35 ...

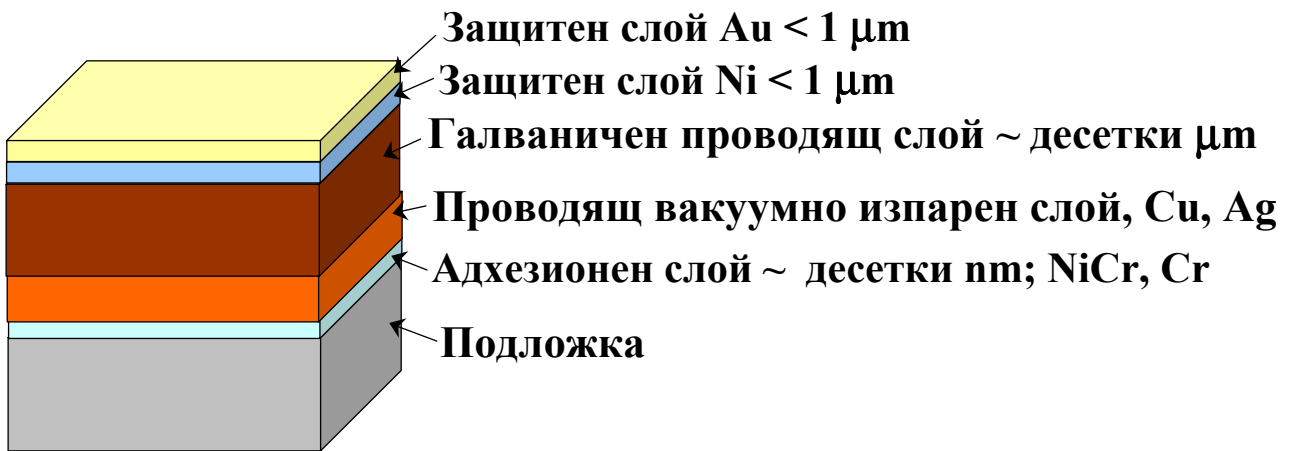
Специално лепило ~ nm

Мека подложка (платна от
подсилващи влакна + пълнители)

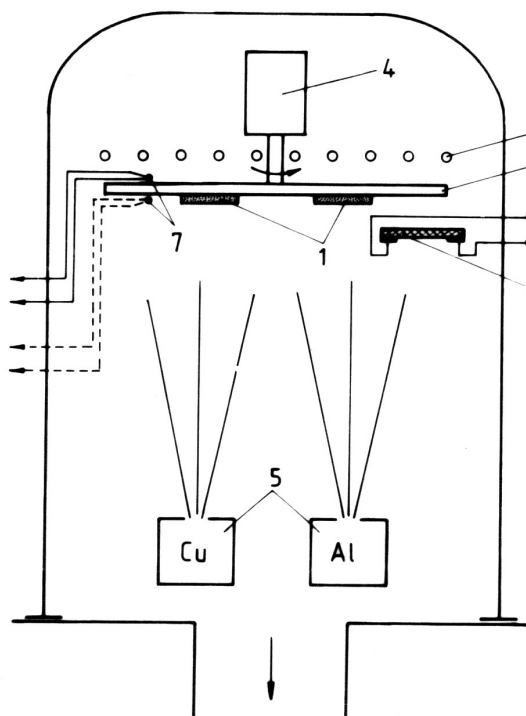


Технология на микролентови структури (2)

2. Твърди керамични подложки



Технология на микролентови структури (3)

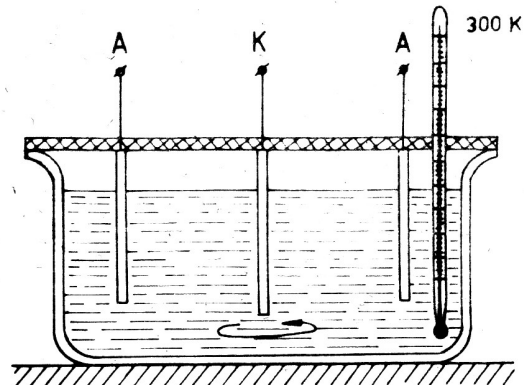
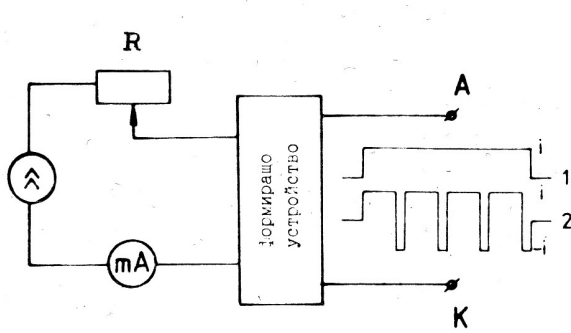


Към вакуумната помпа

Части:

- Подложки
- Държател
- Нагревател
- Мотор
- Изпарител
- Контрол на дебелината на слоя
- Контрол на температурата

Технология на микролентови структури (4)



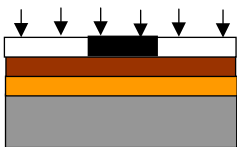
Части:

- Анод А (две Си-платки); Катод К (метализирана подложка)
- Електролит (пример: H_2SO_4 (170ml/l); CuSO_4 (80ml/l); блеско-образувател (0.5ml/l); $t = 40\text{-}60^\circ\text{C}$; плътност на тока 1 A/dm^2)
- импулсен източник (10:1 отношение)

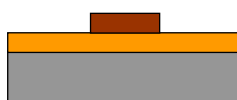
Технология на микролентови структури (5)



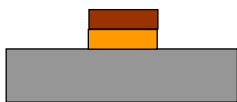
1. Отлагане на позитивен фоторезист



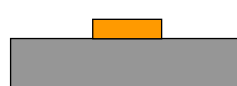
2. Експозиция с UV светлина през черно-бяла фотомаска с негативно изображение



3. Проявяване на осветения фоторезист с химичен проявител (напр. 1% KON)



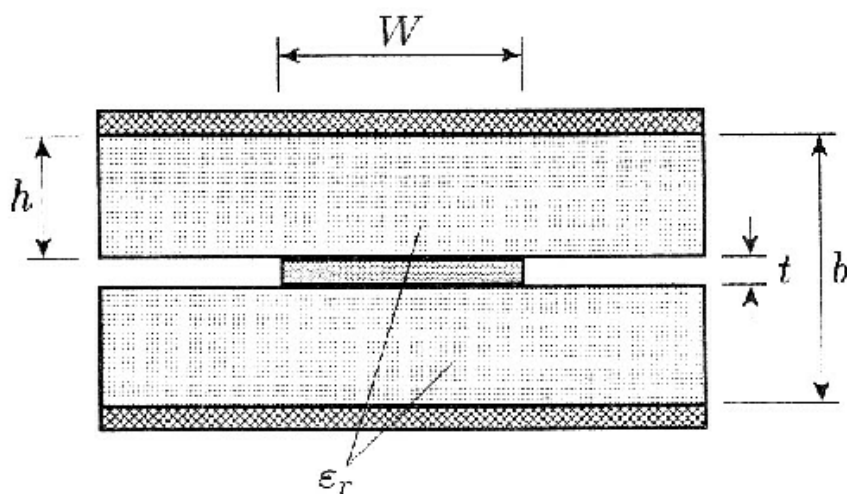
4. Ецване на метала с химичен разтвор (напр. Fe_2Cl_3)



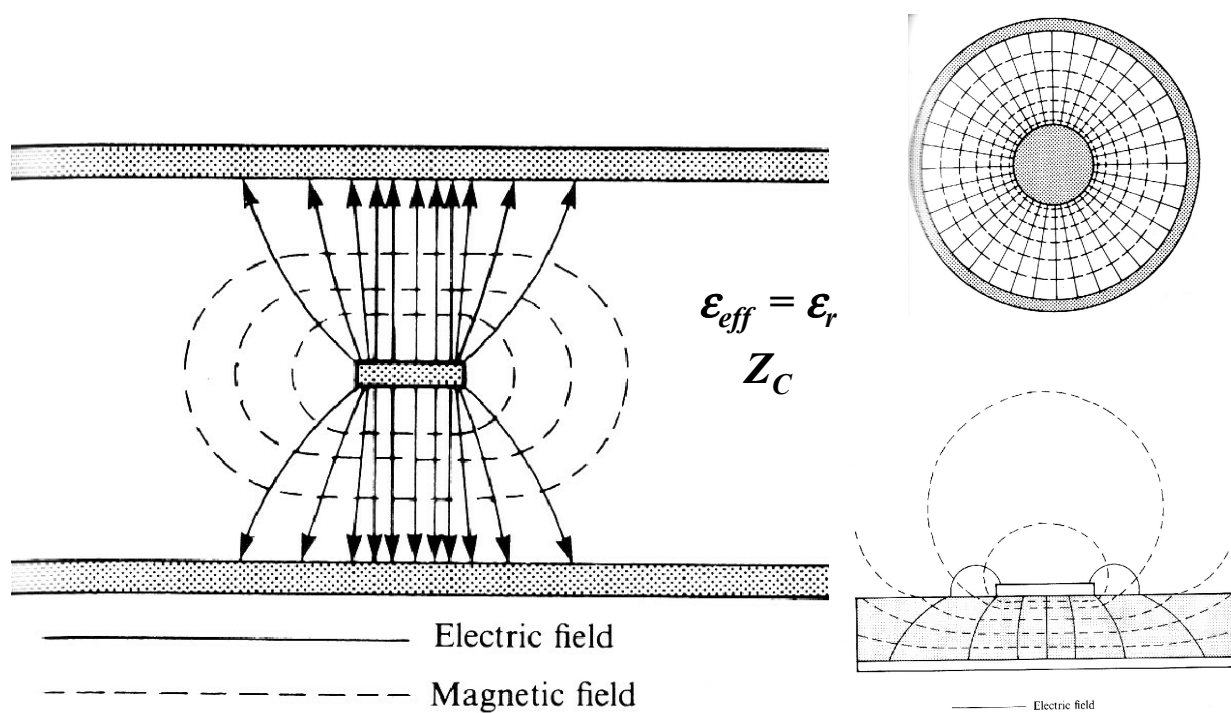
5. Почистване на неосветения фоторезист с химичен разтворител

Други планарни предавателни структури

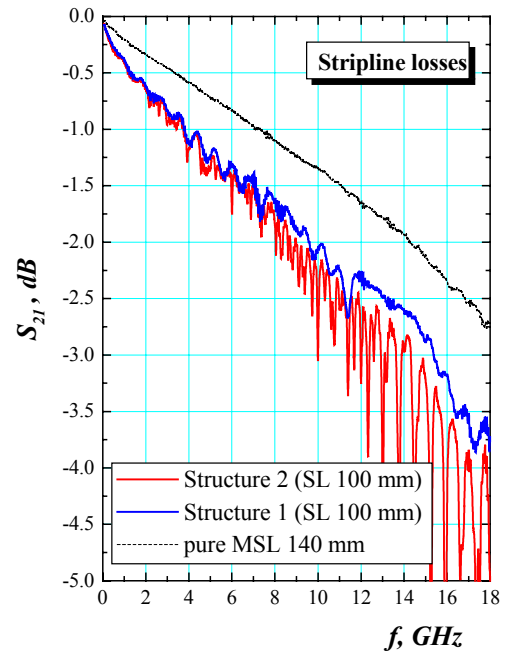
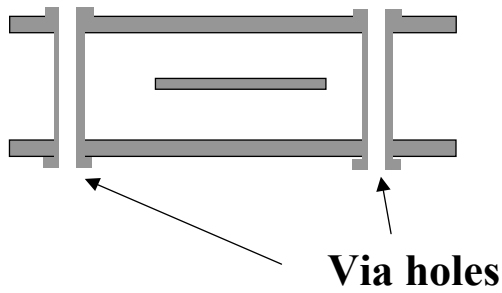
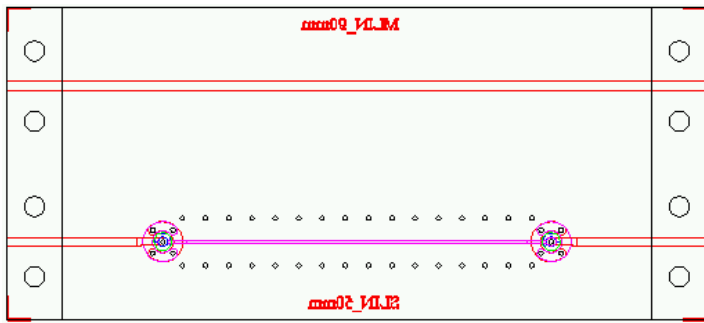
Лентова линия



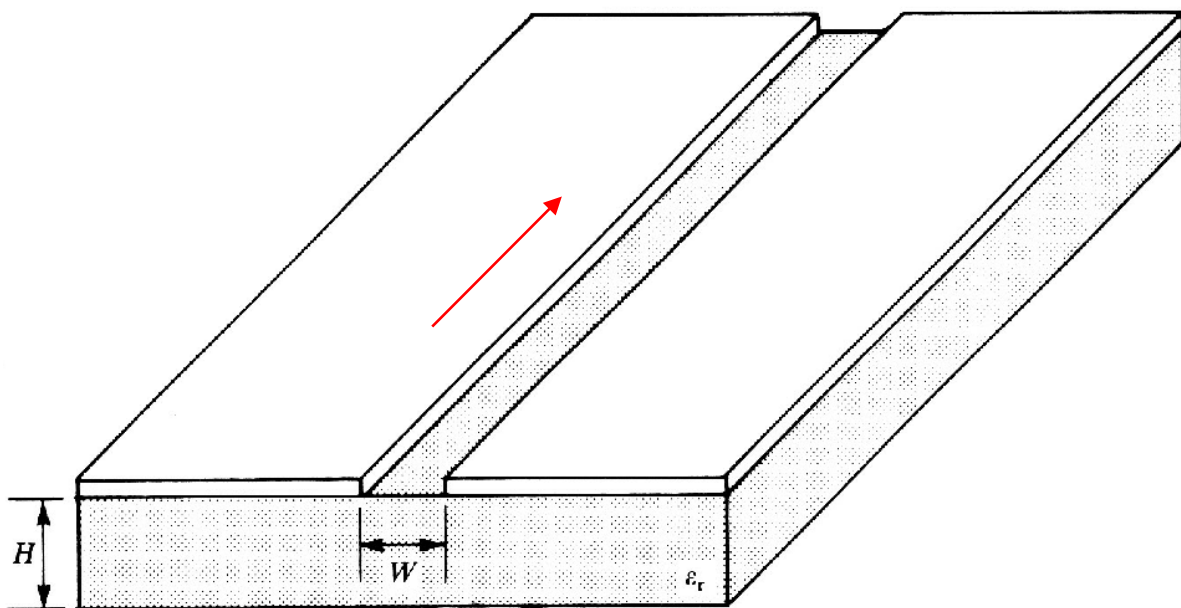
Лентова линия (2)



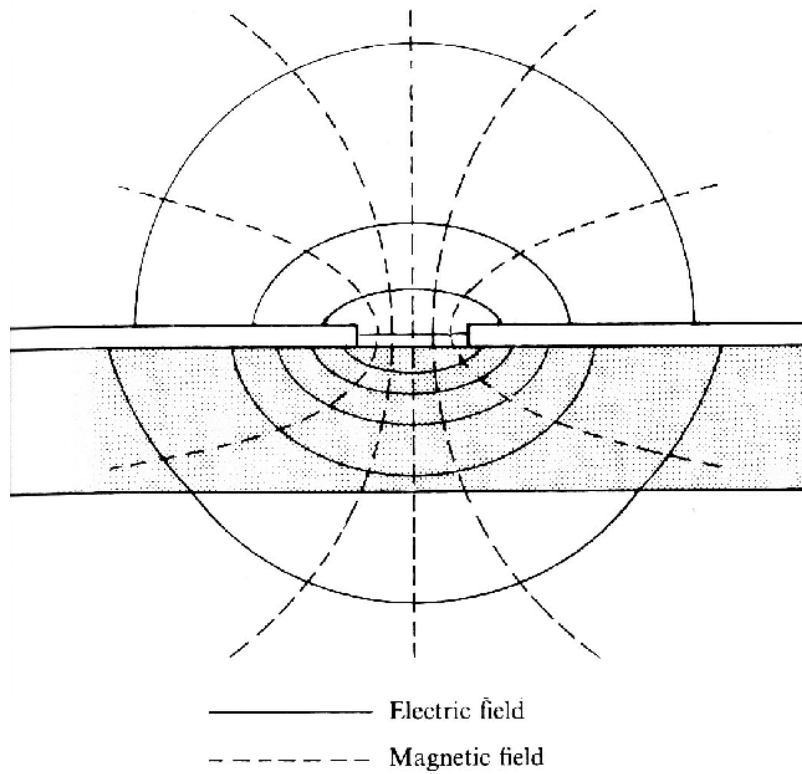
Лентова линия (3)



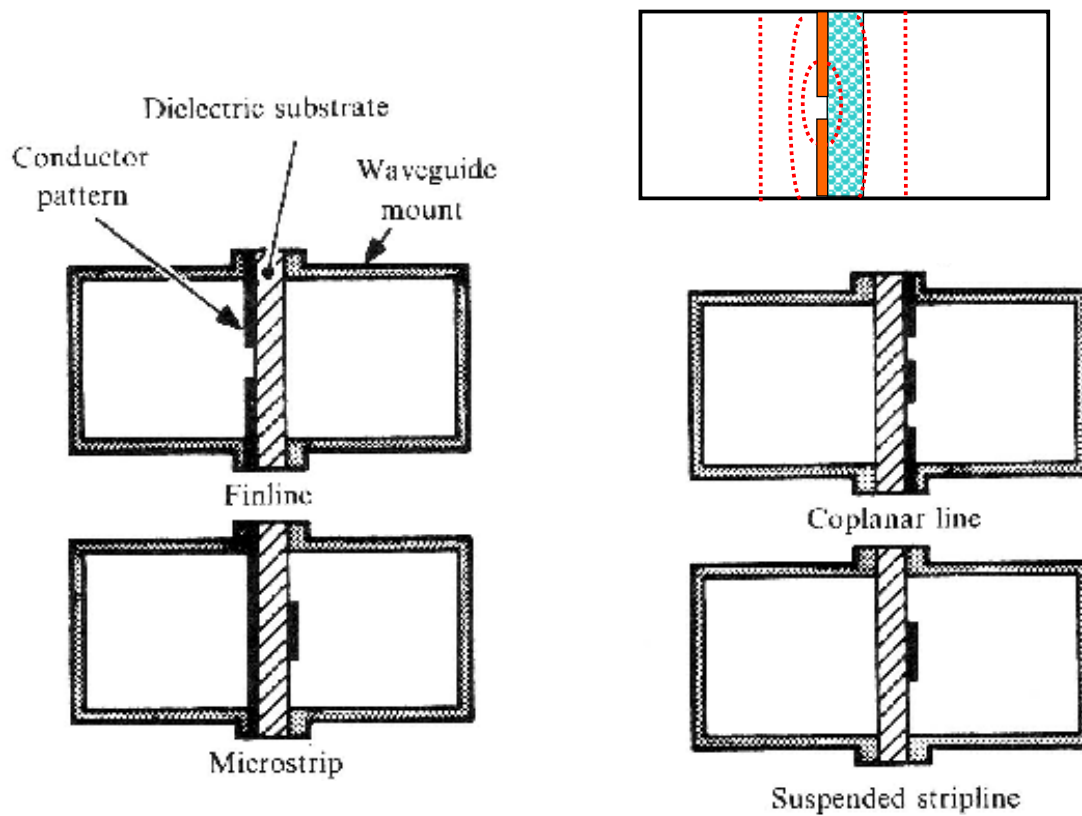
Процепна линия



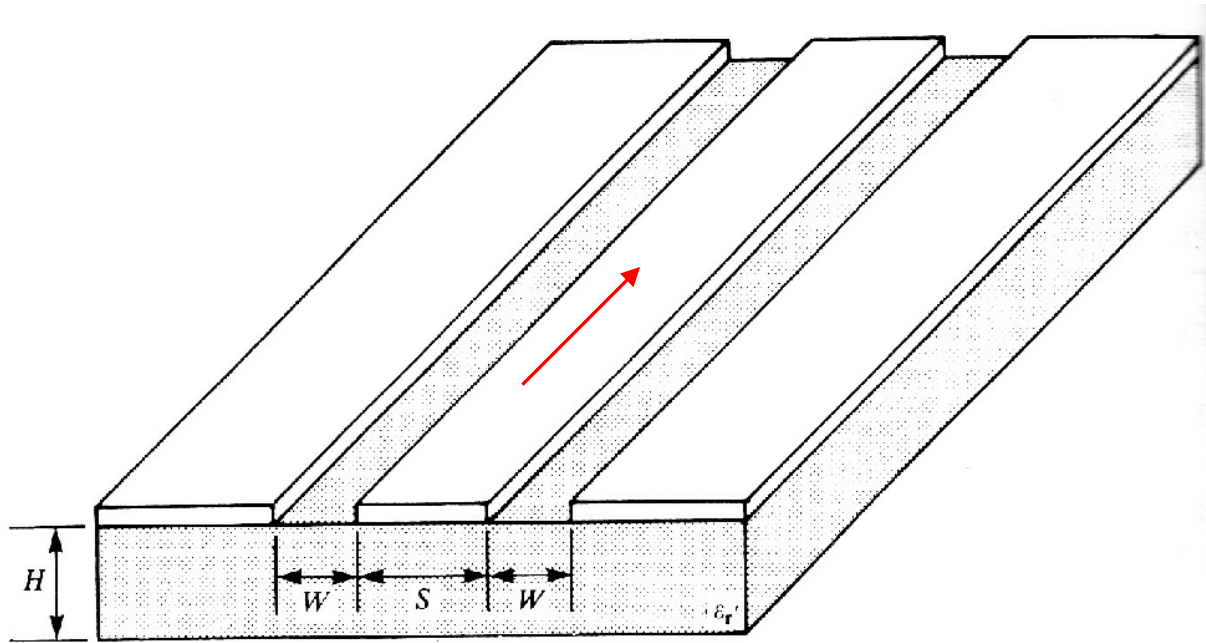
Процепна линија (2)



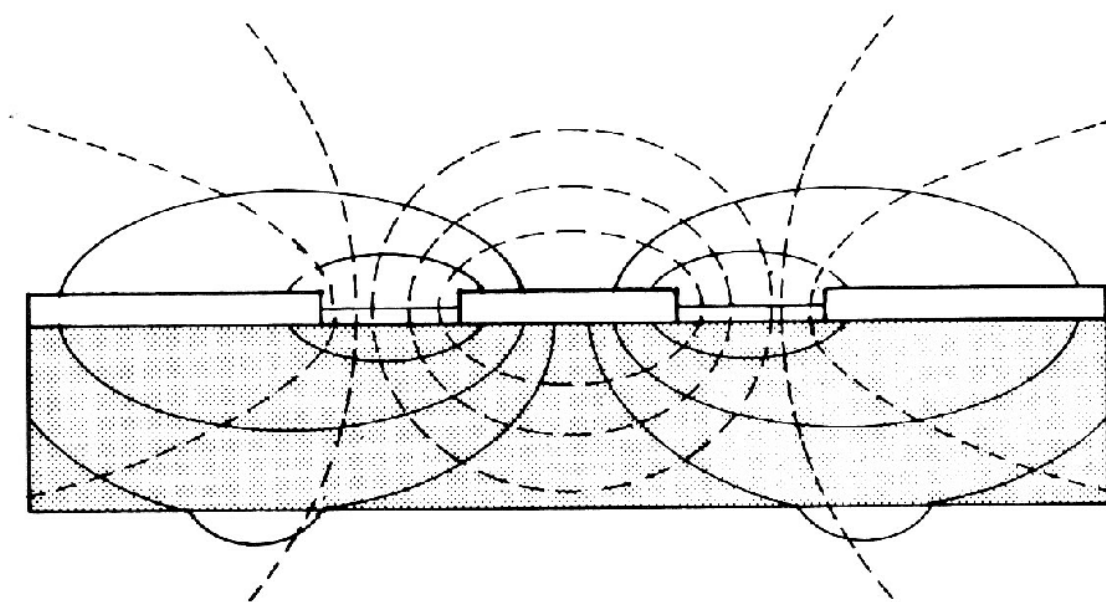
Процепна линија (3 - finline)



Копланарен вълновод

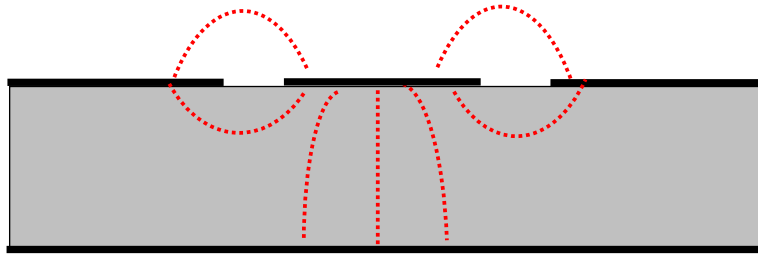


Копланарен вълновод (2)

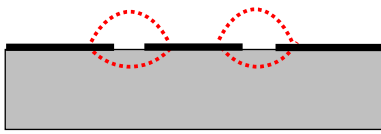


- Electric field
- - - - - Magnetic field

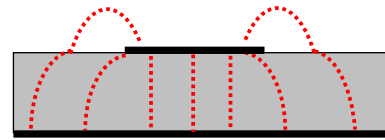
Заземен копланарен вълновод



Заземен копланарен вълновод

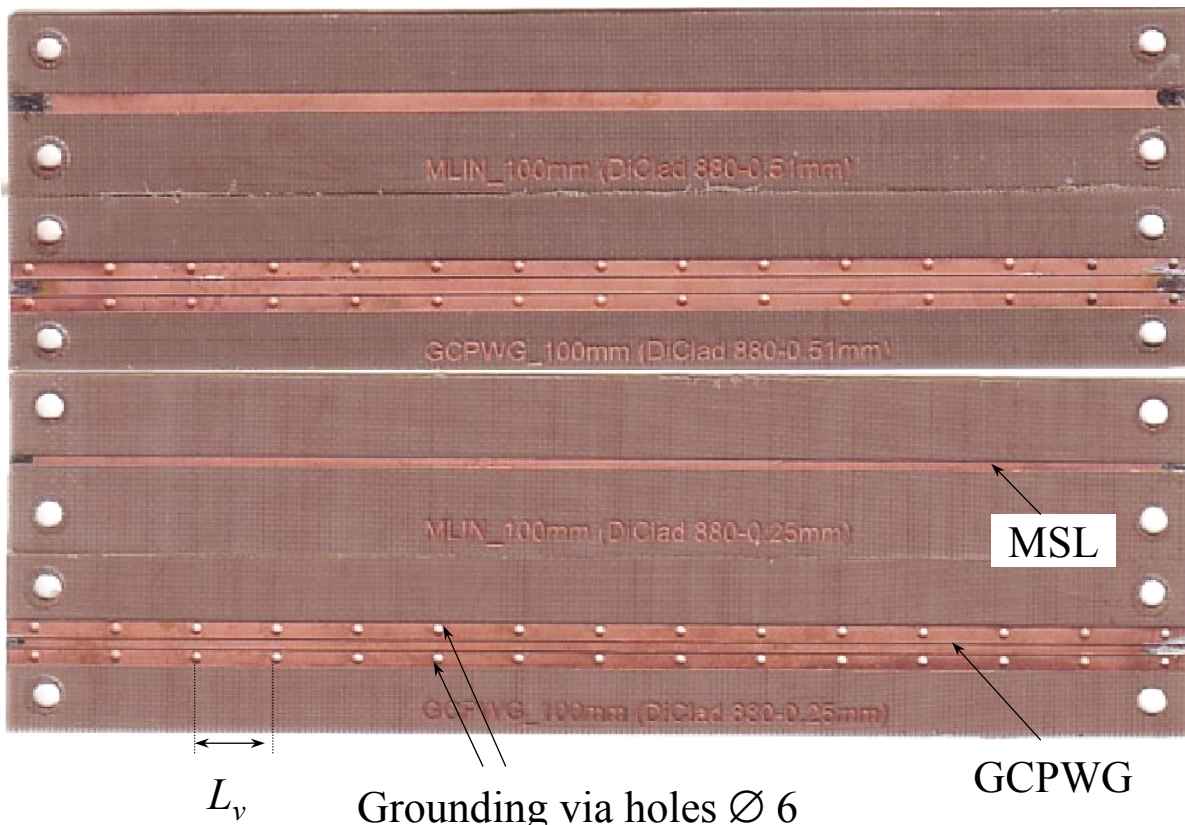


Копланарен вълновод

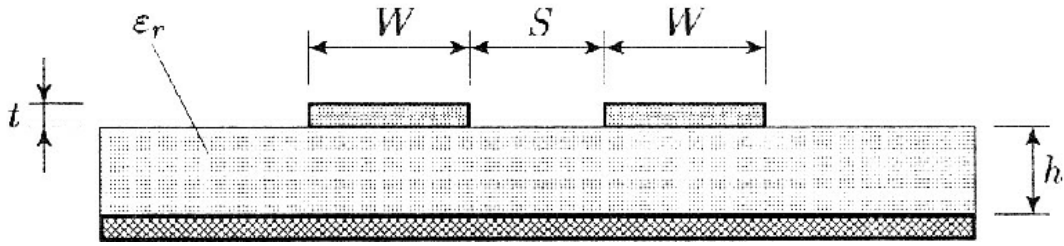


Микролентова линия

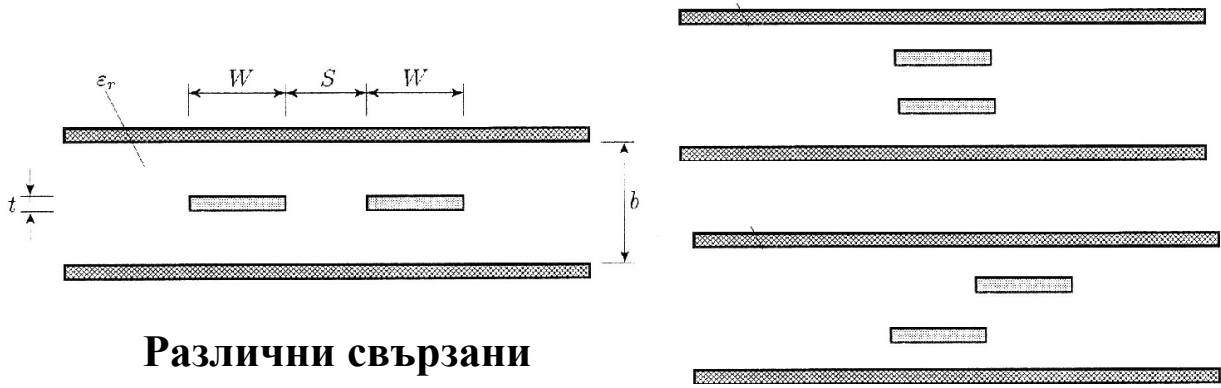
Заземен копланарен вълновод (2)



Свързани линии



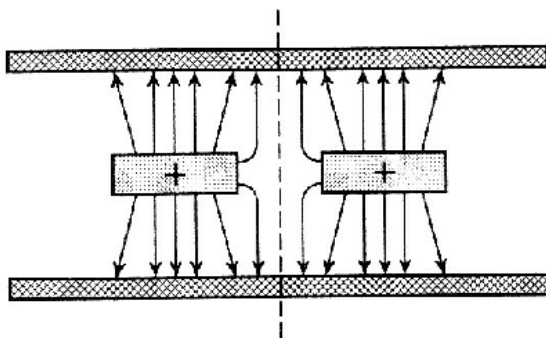
Свързани микролентови линии



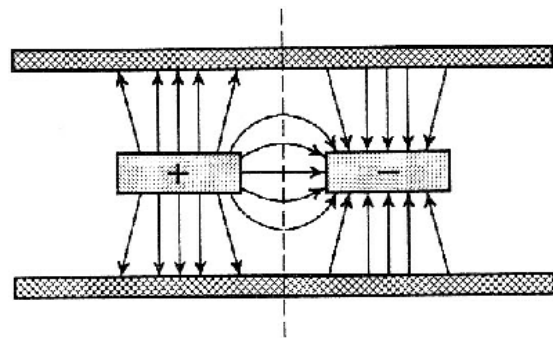
Различни свързани лентови линии

Свързани линии (2)

Четно възбуждане (even)

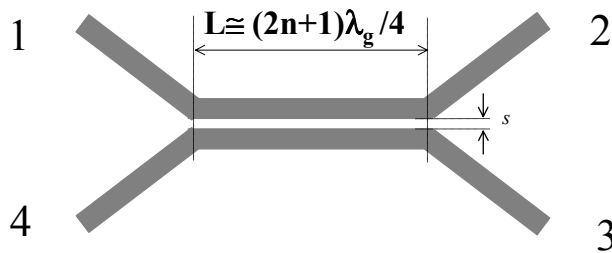


Нечетно възбуждане (odd)



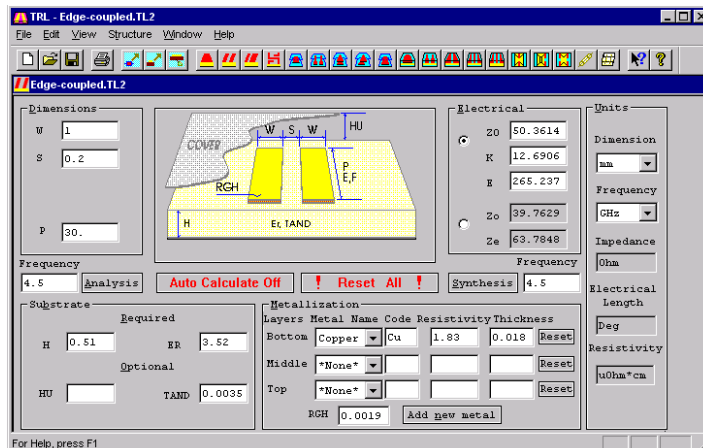
$$\text{even } Z_0 > Z_0 > \text{odd } Z_0$$

Свързани линии (3)



$$C, dB = 20.1g \left(\frac{\text{even } Z_c - \text{odd } Z_c}{\text{even } Z_c + \text{odd } Z_c} \right)$$

Насочени отклонители



Сравнение между планарните предавателни структури (вълноводи)

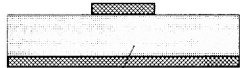



✓ по импеданс

Ограничения на постижимия импеданс: отгоре (Z_{max}) и отдолу (Z_{min})

- **Технологични** (минимални широчини на микролентата и на разстоянието между лентите)
- **Възбуждане на висши модове** (максимални размери на виворчината на микролентата и на височината на подложката \ll дължината на вълната / 2)

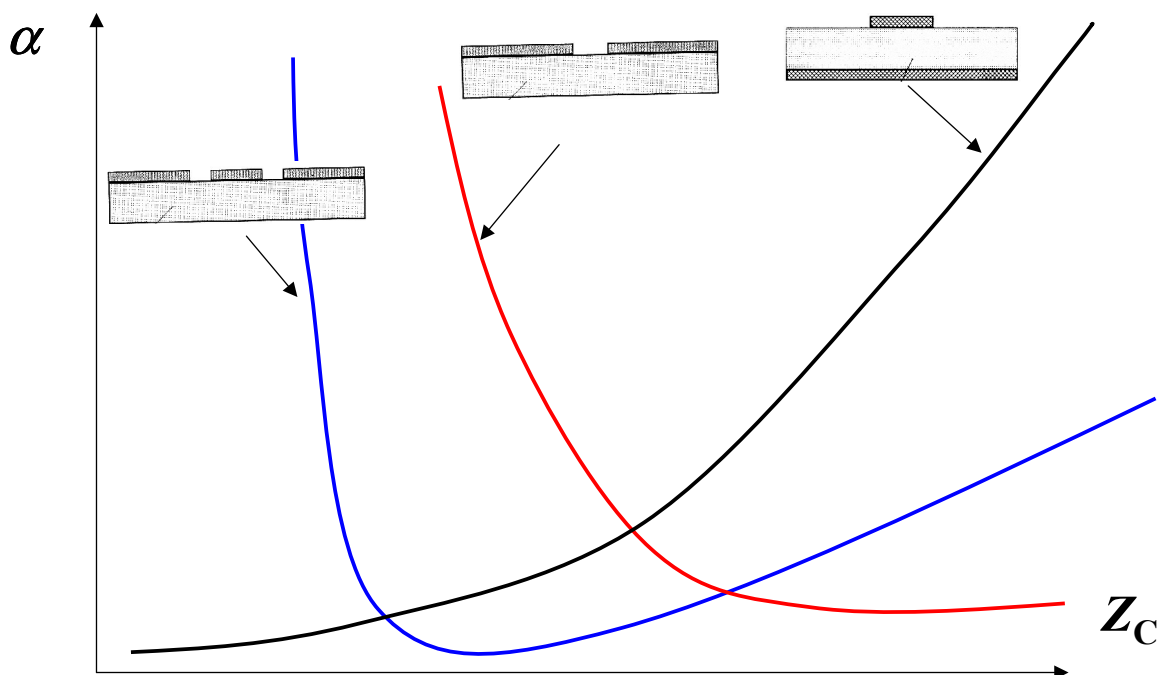
Сравнение между планарните линии

✓ по импеданс

Линия	Z_{\min} , Ω	Z_{\max} , Ω
MSL 	8 - 11 (m)	100-110 (d)
SlotLine 	35 (d)	350 (d)
CPW 	20 (m, d)	240 (m, d)
SL 	5 - 10 (pp)	< 100 (d)

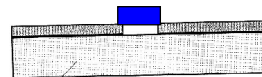
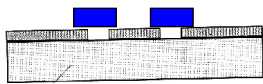
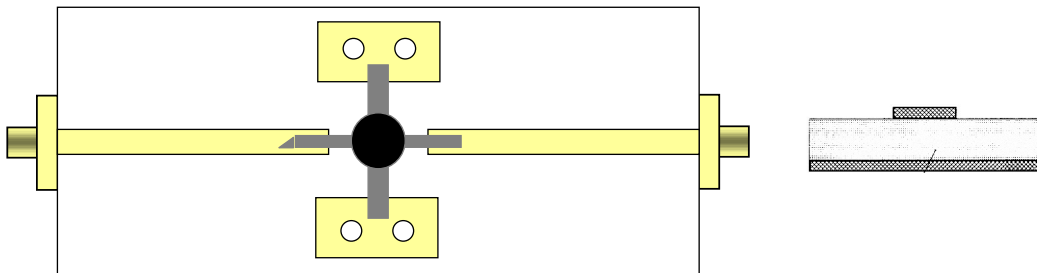
Сравнение между планарните линии (2)

✓ по загуби

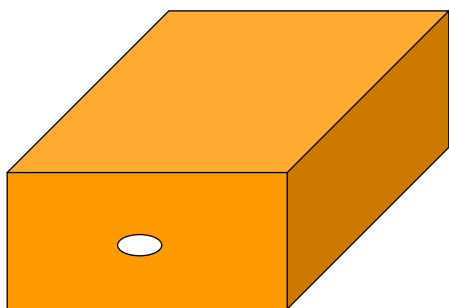


Сравнение между планарните линии (3)

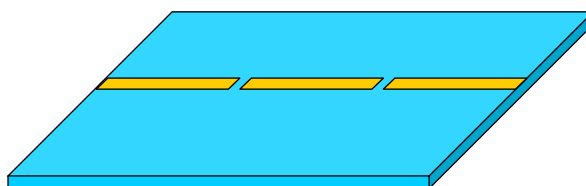
✓ приложимост в ИС



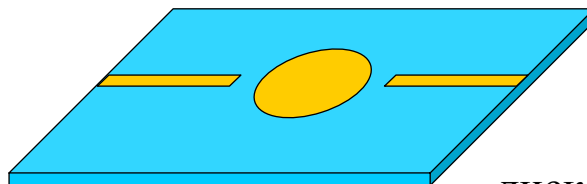
Планарни резонатори



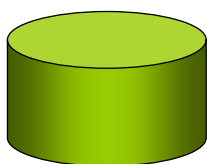
ВЪЛНОВОДНИ



МИКРОЛЕНТОВИ



ДИСКОВИ

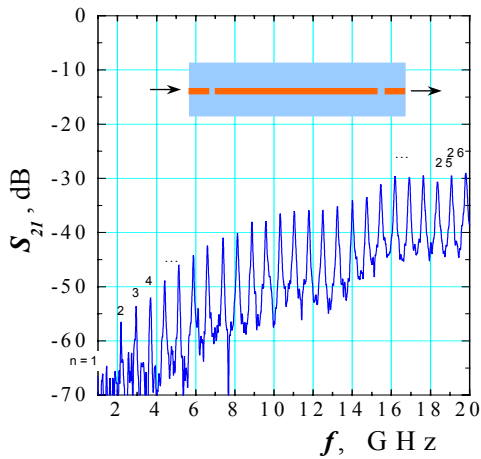
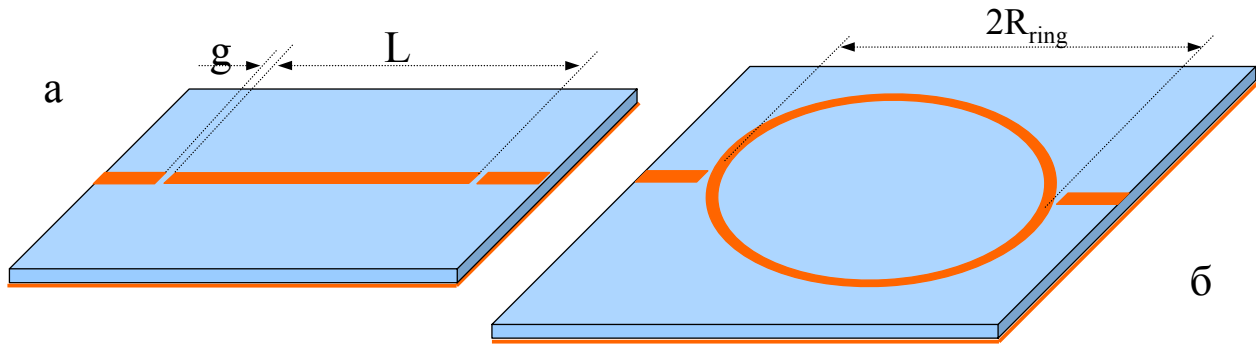


ДИЕЛЕКТРИЧНИ

Основни параметри:

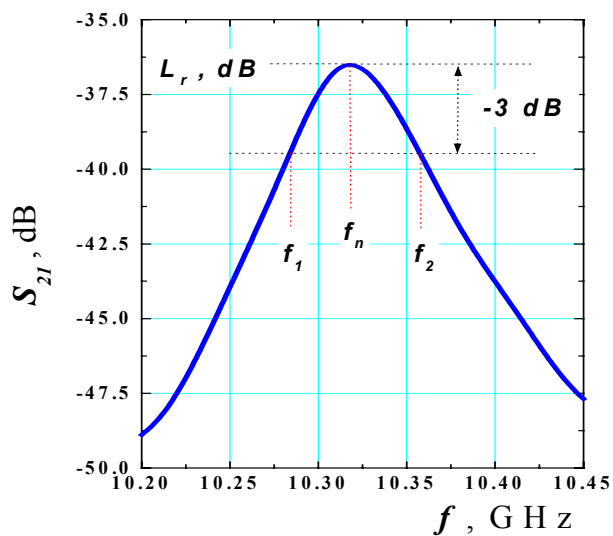
- резонансна честота на всеки резонансен мод;
- качествен (Q-) фактор;

Планарни резонатори (2)



$$L_{eff}, \text{ cm} = n \frac{\lambda_g}{2} = n \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}}$$

Планарни резонатори (3)

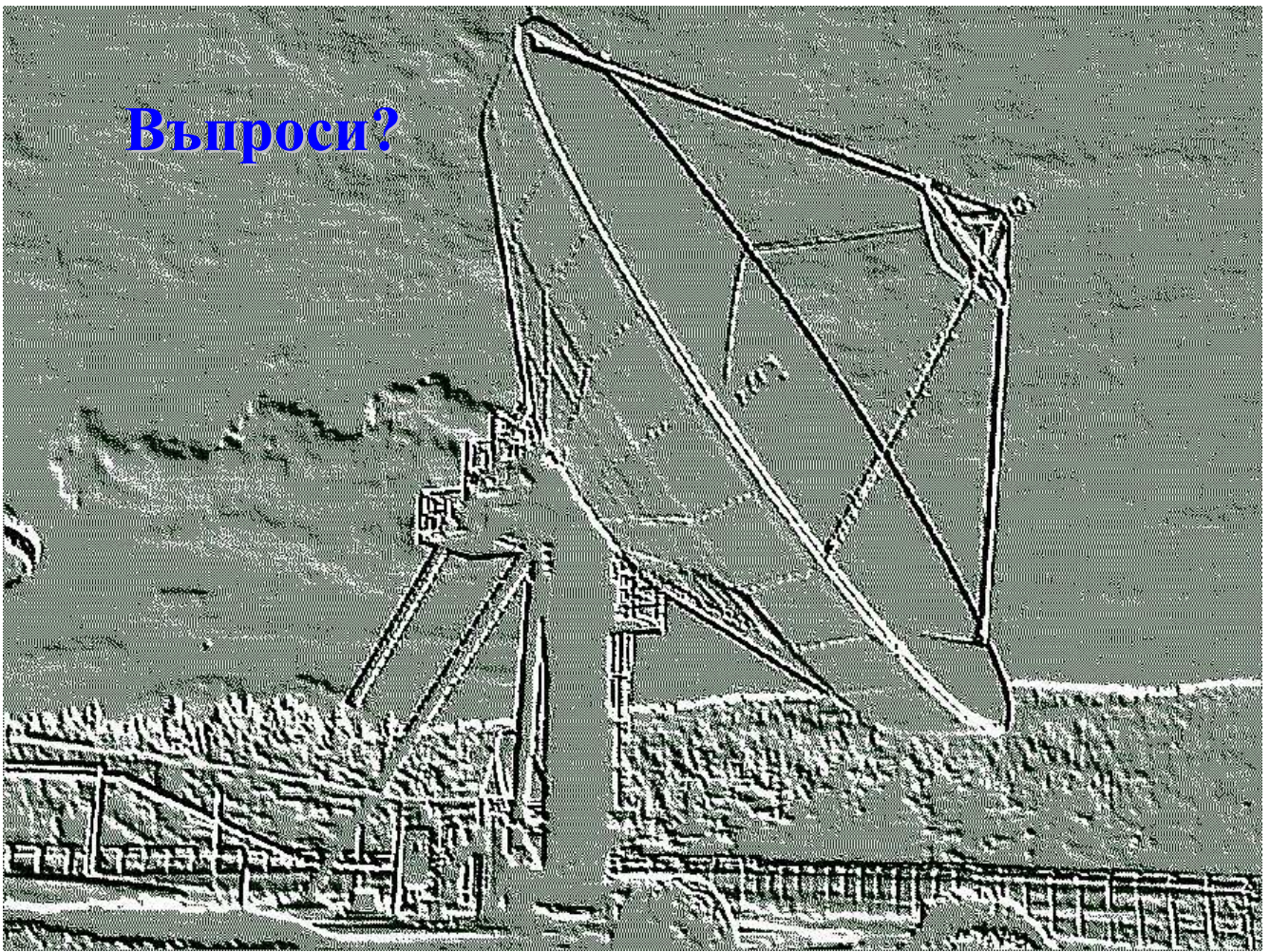


$$\alpha_{tot} \text{ dB/cm} = \frac{27.3}{Q_0 \lambda_g [\text{cm}]}$$

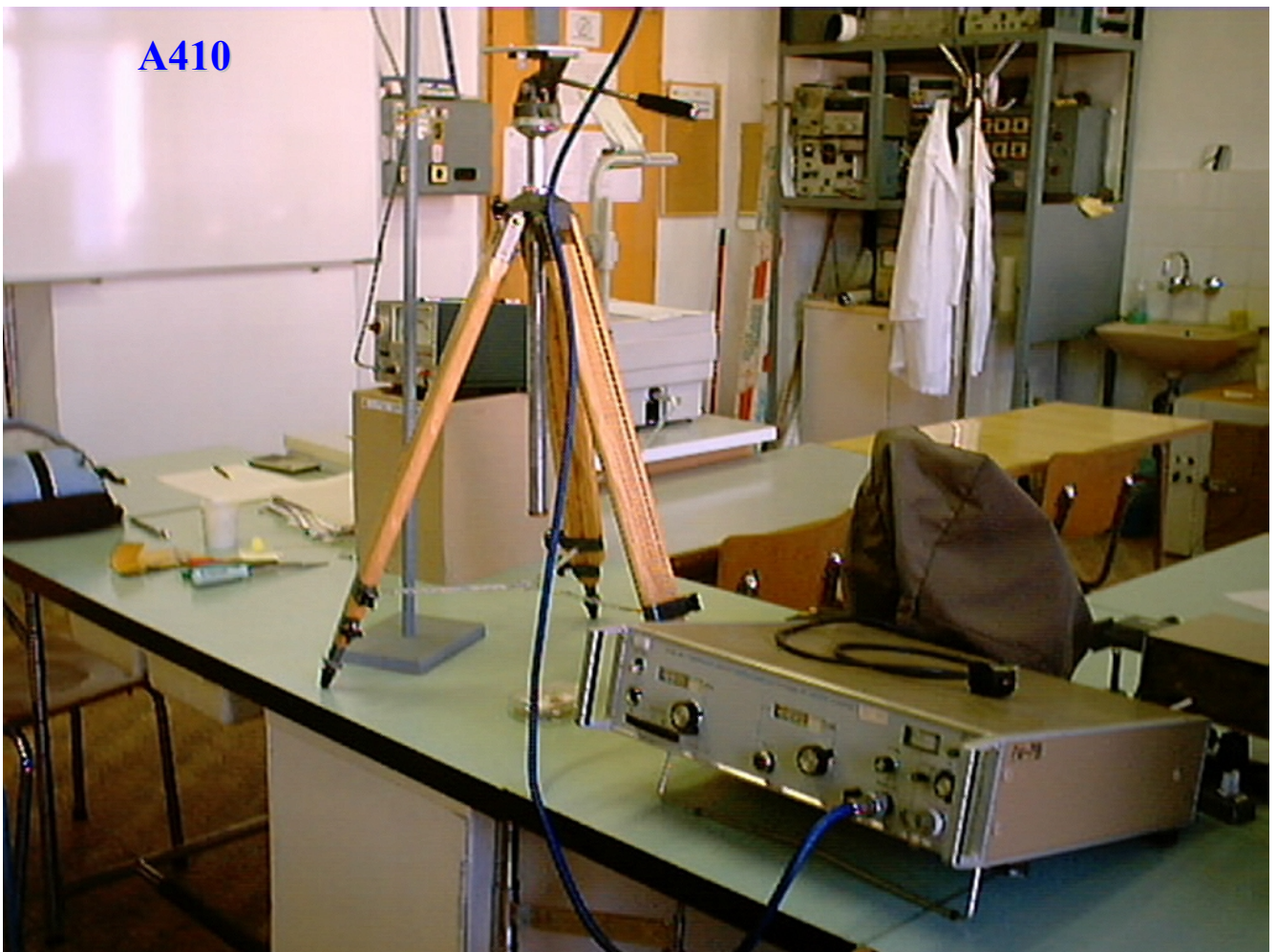
$$Q_L = \frac{f_r}{\Delta f^{-3\text{dB}}}$$

$$Q_0 = \frac{Q_L}{1 - 10^{|L_r|/20}}$$

Въпроси?



A410





Космически център с. Плана, Софийско

Упражнение No. 1 (TRL калкулатори)

Пример: Микролентова линия

Параметри на подложката:

височина, диелектрична проникваемост;
(+ тангенс на диелектричните загуби)

Параметри на метализацията:

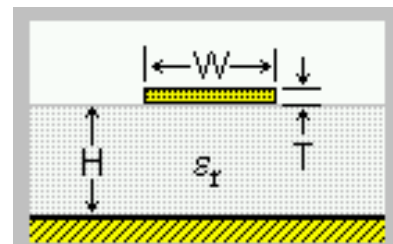
може и без метализация

дебелина, тип на метала (проводимост или
повърхнинен импеданс)

допълнително (грапавост на подложката)

Други параметри:

честота



Упражнение No. 1 (TRL калкулатори)

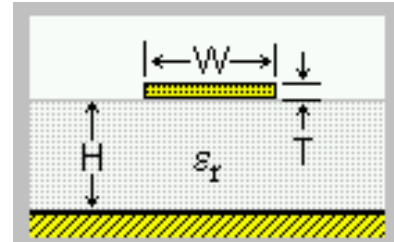
Пример: Микролентова линия (2)

Геометрични параметри: (Analysis)

широчина и дължина

Електрически параметри: (Synthesis)

импеданс и електрическа дължина



Други изходни данни:

ефективна диелектрична проникваемост; загуби
(общи и поотделно - диелектрични загуби и загуби в метализацията)

Микролентова линия (TxLine калкулатор)

Material Parameters	Value
Dielectric	GaAs
Dielectric Constant	12.9
Loss Tangent	0.0005
Conductor	Silver
Conductivity	6.14E7 S/m

Electrical Characteristics	Value
Impedance	50 Ohms
Frequency	10 GHz
Electrical Length	90 deg
Propagation Constant	34806 deg/m
Effective Diel. Const.	8.4015
Loss	32.401 dB/m

Physical Characteristic	Value
Physical Length (L)	2.5857 mm
Width (W)	0.05 mm
Height (H)	0.1 mm
Thickness (T)	1 um

Нова версия

Микролентова линия (TxLine калкулатор)

Transmission Line Calculator

Microstrip Stripline CPW Grounded CPW Slot Line

Width (W) 1.14 mm
Height (H) 0.51 mm
Thickness (T) 18 um

Line Parameters
Frequency 12.5 GHz
Physical Length 70.488 mm
Dielectric Constant 3.43
Conductivity 49000 S/mm
Loss Tangent 0.0032

Electrical Characteristics
Electrical Length 1774.625 deg
Propagation Constant 251.7627 deg/cm
Loss 0.08010771 dB/cm

Impedance (Ohms) 51.56
Effective Diel. Const. 2.813191

Analyze
Synthesize
Help

Стара версия

Микролентова линия (TRL калкулатор)

TRL - Microstrip1

File Edit View Structure Window Help

Microstrip1

Dimensions
W 2.66924
P 17.2397

Electrical
Z0 8.67214
E 87.8102

Units
Dimension mm
Frequency GHz
Impedance Ohm
Electrical Length Deg
Resistivity uOhm*cm

Frequency 3
Analysis Auto Calculate Off ! Reset All ! Synthesis 3

Substrate
Required
H .1 ER 2.1
Optional
HU TAND 0.001
Msat 0 Tanm 0 Mrem 0

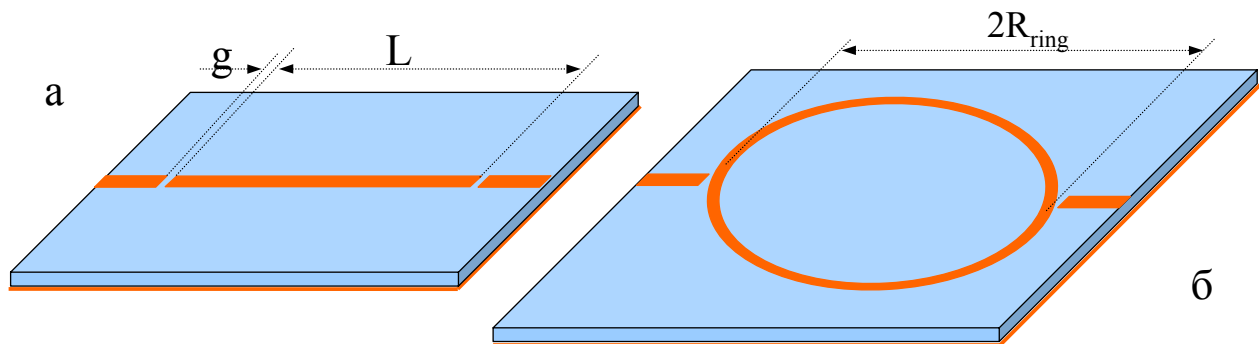
Metallization
Layers Metal Name Code Resistivity Thickness
Bottom .05 Reset
Middle Reset
Top Reset
RGH 0.002 Add new metal

Свободен само за микролентова и лентова линии

Микролентова линия (AppCAD калкулатор)

Agilent AppCAD калкулатор

Микролентови резонатори (с TRL калкулатори)

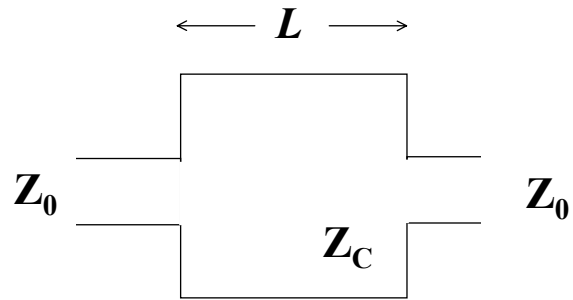
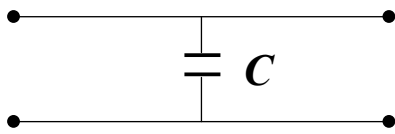


Трудоемко: трябва да се променя честотата, докато дадената дължина на линията даде определена електрическа дължина на резонатора $L_{eff} = n\lambda_g/2$;

по-добре е по формулата по-горе с асистенция на TRL калкулатора за ефективната диелектрична проницаемост ϵ_{eff}

Микролентови индуктивности и капацитети (TRL калкулатори)

1) Паралелен капацитет



$$C, \text{ pF} \approx 3.33 \frac{L \sqrt{\epsilon_{eff}}}{Z_C}$$

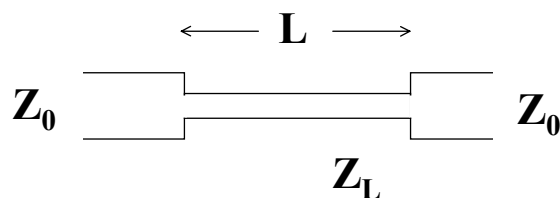
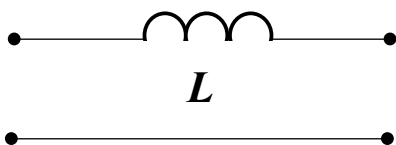
$$L, \text{ mm}; \quad Z_C, \Omega$$

$$L \ll \lambda_g / 8; \quad Z_C < Z_0$$

С TRL калкулатор: изчисляват се $L < \lambda_g / 8$; $Z_C = ?$ и ϵ_{eff}

Микролентови индуктивности и капацитети (TRL калкулатори)

2) Последователна индуктивност



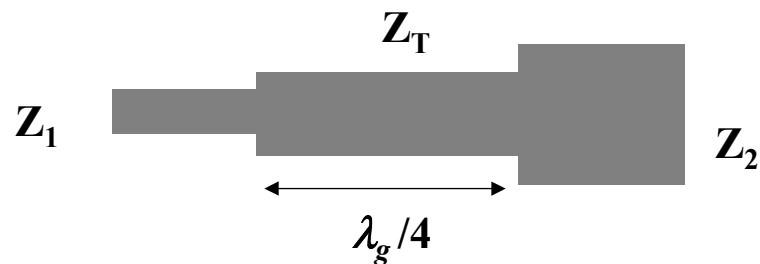
$$L, \text{ nH} \approx \frac{Z_L L \sqrt{\epsilon_{eff}}}{300}$$

$$L, \text{ mm}; \quad Z_L, \Omega$$

$$L \ll \lambda_g / 8; \quad Z_L > Z_0$$

С TRL калкулатор: изчисляват се $L < \lambda_g / 8$; $Z_L = ?$ и ϵ_{eff}

Четвърт-вълнови трансформатори на импеданс (с TRL калкулатори)



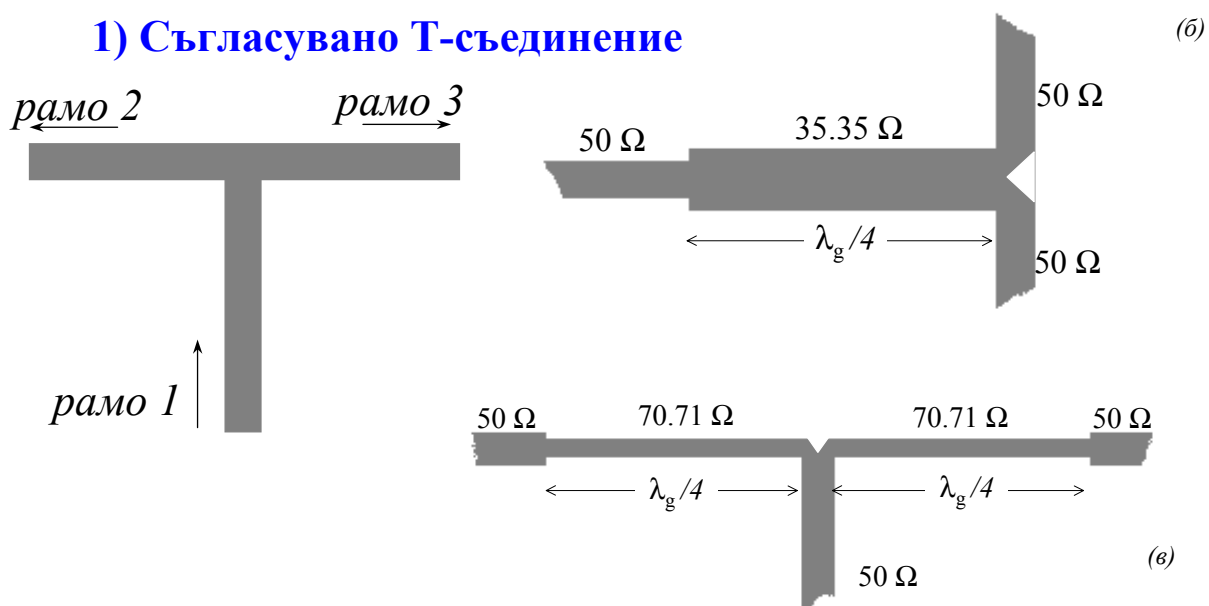
С TRL калкулатор:

за
$$Z_T = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2}$$

се определя $\lambda_g/4 = ?$ и $w_T = ?$

Устройства за разпределяне на микровълнова мощност (с TRL калкулатори)

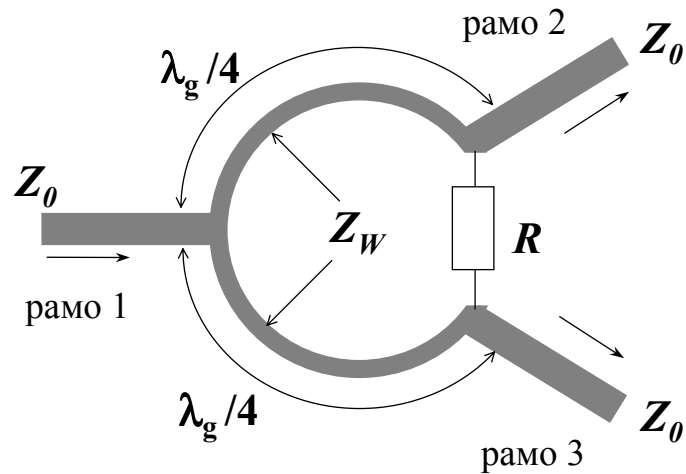
1) Съгласувано T-съединение



С TRL калкулатор: определя се $\lambda_g/4 = ?$ (за Z_T) и $w_T = ?$

Устройства за разпределяне на микровълнова мощност (с TRL калкулатори)

2) Мост на Wilkinson

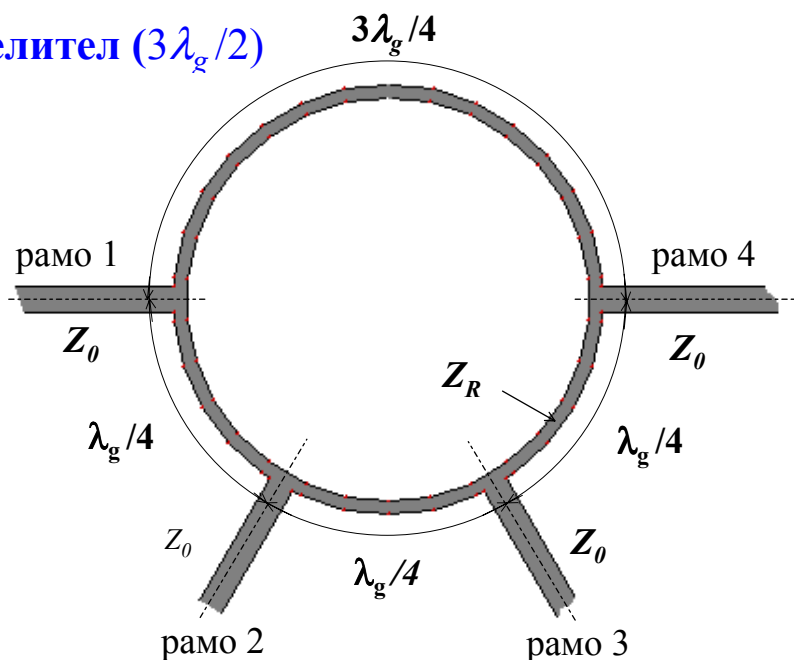


$$Z_W = Z_0 \sqrt{2}; R = 2 Z_0$$

С TRL калкулатор: определя се $\lambda_g/4 = ?$ (за Z_W) и $w_T = ?$

Устройства за разпределяне на микровълнова мощност (с TRL калкулатори)

3) Пръстеновиден делител ($3\lambda_g/2$)

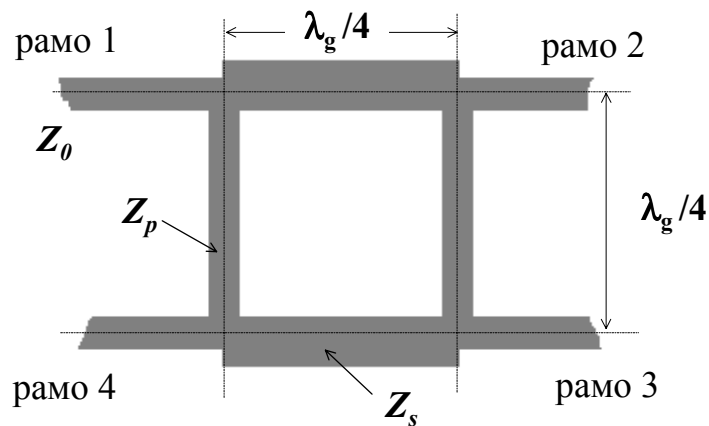


$$Z_R = Z_0 \sqrt{2}$$

С TRL калкулатор: определя се $\lambda_g/4 = ?$ (за Z_R) и $w_T = ?$

Устройства за разпределяне на микровълнова мощност (с TRL калкулатори)

4) Хибриден делител ($\lambda_g/4$)

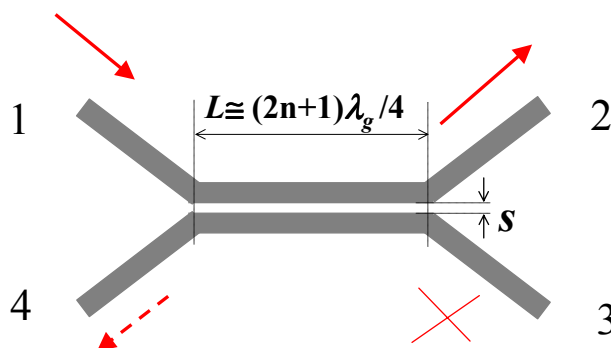


$$Z_s = Z_0 / \sqrt{2}; \quad Z_p = Z_0$$

С TRL калкулатор: $\lambda_g/4 = ?$ (за Z_T) и $w = ?$ (за дадената подложка)

Устройства за разпределяне на микровълнова мощност (с TRL калкулатори)

5) Насочен отклонител



$$C, \text{ dB} = 20.1 \lg \left(\frac{\text{even } Z_c - \text{odd } Z_c}{\text{even } Z_c + \text{odd } Z_c} \right)$$

С TRL калкулатор: $L = (2n+1)\lambda_g/4 = ?$ (за $Z_{\text{microstrip}}$)

по зададени $C, \text{ dB}$ и Z_0 се търси s и w

или по зададени s и w се търси $C, \text{ dB}$ и Z_0

Устройства за разпределяне на микровълнова мощност (с TRL калкулатори)

С TRL калкулатор: за свързани линии: задава се микро-лентовия импеданс и връзката в dB и се определя дължината

