



Introdução aos metamateriais eletromagnéticos

Prof. Dr. Gláucio Lima Siqueira



Instituto de Inovação
em Meta Materiais

PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA

Informações gerais

- Contato
 - glaucio@cetuc.puc-rio.br
- Dia e horário do curso
 - Sextas-feiras, de 09h às 12h
 - Sala 3 do CETUC
- Avaliação
 - Lista de exercícios
 - Projeto final
- Referência Bibliográfica
 - ELE5322 21st Century Electromagnetics, Dr. Raymond C. Rumpt, UTEP, USA
 - <http://emlab.utep.edu/ee5390em21.htm/>

Ementa (I)

- **Parte 1 – Eletrodinâmica em meios periódicos**
 - Tópico 1 – Revisão do eletromagnetismo clássico
 - Tópico 2 – Modelos de Drude e Lorentz para condutores e dielétricos
 - Tópico 3 – Propagação da onda eletromagnética em meios anisotrópicos e não lineares
 - Tópico 4 – Teoria dos modos acoplados
 - Tópico 5 – Teoria das estruturas periódicas
 - Tópico 6 – Redes de difração
 - Tópico 7 – Ressonância do modo guiado
 - Tópico 8 – Teoria dos metamateriais

Ementa (II)

- **Parte 2 – Fenômeno e aplicações de metamateriais**
 - Tópico 9 – Homogeneização de estruturas periódicas
 - Tópico 10 – Eletromagnetismo transformacional aplicado aos metamateriais
 - Tópico 11 – Ondas de superfície
 - Tópico 12 – Ondas lentas
 - Tópico 13 – Linha de transmissão orientada à esquerda
 - Tópico 14 – Aplicações de metamateriais

Tópicos 13 e 14

LTes e Aplicações de Metamateriais

- Linhas de transmissão orientadas à esquerda
- Parâmetros Materiais das LTeS
- Casualidade dos parâmetros materiais negativos
- Índice de Refração de uma LTe
- Realização física de uma LTe
- O paradoxo de fase das LTeS
- Comparação com superfícies orientadas à esquerda
- Aplicações

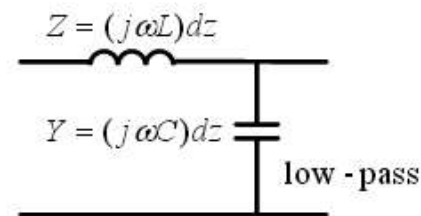
Linhas de Transmissão Orientadas à Esquerda (LTE)

PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA

LTE (1)

- LTEs são o dual das LT convencionais

Linhas de transmissão convencionais



$$\gamma = j\beta = \sqrt{ZY} = j\omega\sqrt{LC}$$

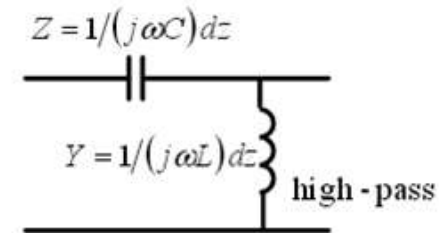
$$\beta = \omega\sqrt{LC} \rightarrow \text{linear}$$

$$\begin{cases} v_p = \omega/\beta = 1/\sqrt{LC} > 0 \\ v_g = d\omega/d\beta = 1/\sqrt{LC} > 0 \end{cases}$$

$$v_p = v_g = \text{cste} \rightarrow \text{no distortion}$$

$$\eta = \sqrt{Z/Y} = \sqrt{(j\omega L)/(j\omega C)} = \sqrt{L/C}$$

Linhas de transmissão à esquerda



$$\gamma = j\beta = \sqrt{ZY} = -j/(\omega\sqrt{LC})$$

$$\beta = -1/(\omega\sqrt{LC}) \rightarrow \text{nonlinear}$$

$$\begin{cases} v_p = -\omega^2\sqrt{LC} < 0 \\ v_g = +\omega^2\sqrt{LC} > 0 \end{cases}$$

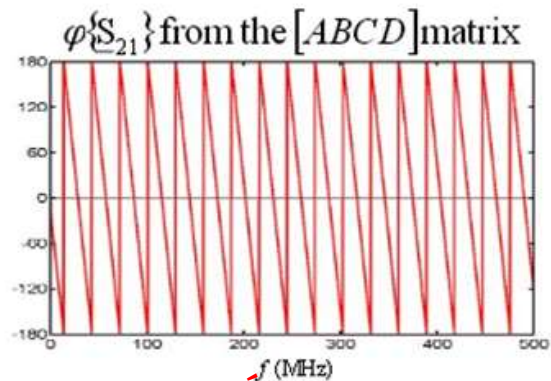
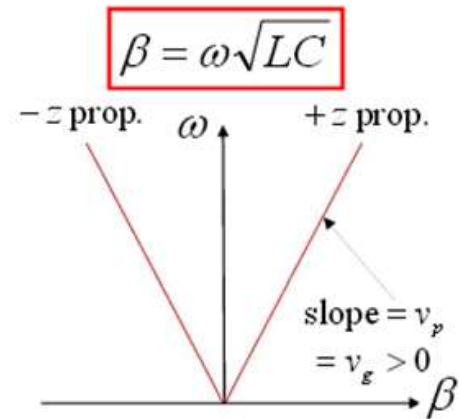
$$v_p = -v_g = \text{fct}(\omega) \rightarrow \text{distortion}$$

$$\eta = \sqrt{(j\omega C)^{-1}/(j\omega L)^{-1}} = \sqrt{L/C}$$

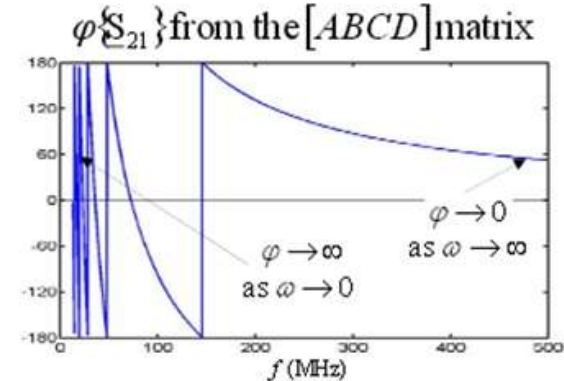
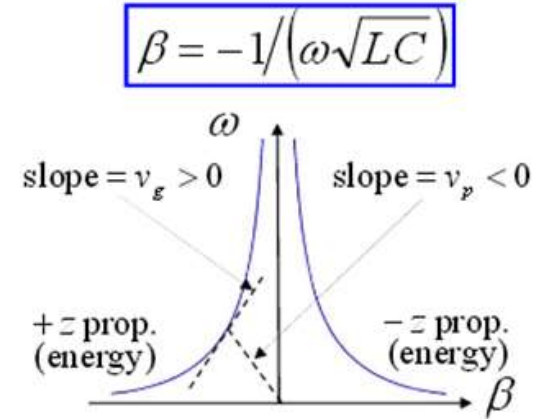
LTE (2)

- LTEs são o dual das LT convencionais

Linhas de transmissão convencionais



Linhas de transmissão à esquerda



Parâmetros materiais das LTEs

- Relação entre impedância/admitância numa LT e o campo EM num meio infinito orientado à direita

$$Z = j\omega L = j\omega\mu$$

$$Y = j\omega C = j\omega\varepsilon$$

- Impedância/admitância numa LTE

$$Z = 1/(j\omega C)$$

$$Y = 1/(j\omega L)$$

- Expressões explícitas dos parâmetros materiais de uma LTE

$$-1/(\omega C) = \omega\mu = -\omega|\mu|$$

$$\Rightarrow \boxed{\begin{array}{l} \mu < 0! \\ \mu = -1/(\omega^2 C) \end{array}}$$

$$-1/(\omega L) = \omega\varepsilon = -\omega|\varepsilon|$$

$$\Rightarrow \boxed{\begin{array}{l} \varepsilon < 0! \\ \varepsilon = -1/(\omega^2 L) \end{array}}$$

Permeabilidade negativa tem natureza capacitiva

Permissividade negativa tem natureza indutiva

Casualidade dos parâmetros materiais negativos

- Condições de entropia são satisfeitas para parâmetros materiais negativos desde que sejam dispersivos

$$\mu = -1/(\omega^2 C)$$

$$\varepsilon = -1/(\omega^2 L)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Total energy: } W &= \frac{\partial(\omega\varepsilon)}{\partial\omega} E^2 + \frac{\partial(\omega\mu)}{\partial\omega} H^2 > 0 \\ \Rightarrow \frac{\partial(\omega\varepsilon)}{\partial\omega} > 0 \quad \text{and} \quad \frac{\partial(\omega\mu)}{\partial\omega} > 0, \quad \forall\omega \end{aligned} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{aligned} \frac{\partial(\omega\varepsilon)}{\partial\omega} &= \frac{1}{\omega^2 L} > 0 \\ \frac{\partial(\omega\mu)}{\partial\omega} &= \frac{1}{\omega^2 C} > 0 \end{aligned} \right.$$

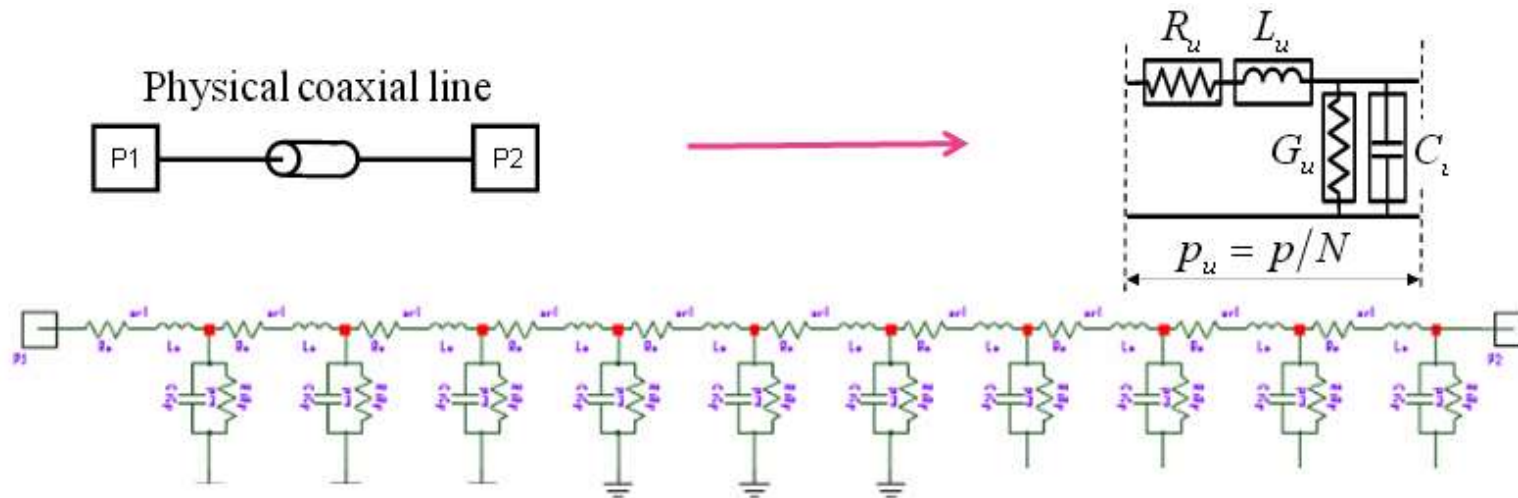
Índice de refração de uma LTE

- O índice de refração de uma LTE é negativo

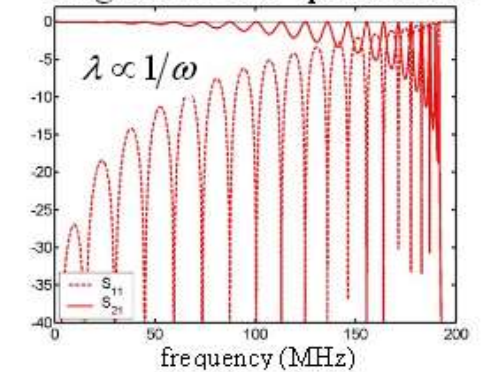
$$\left. \begin{array}{l} \text{LH-TL: } j\beta = \sqrt{ZY} = -j \frac{1}{\omega \sqrt{LC}} \\ \text{Material: } \sqrt{ZY} = \sqrt{(j\omega\mu)(j\omega\varepsilon)} = +j \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{\begin{array}{l} n = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} < 0 \\ n = -\frac{c_0}{\omega \sqrt{LC}} \end{array}}$$

Realização física de uma LTE (1)

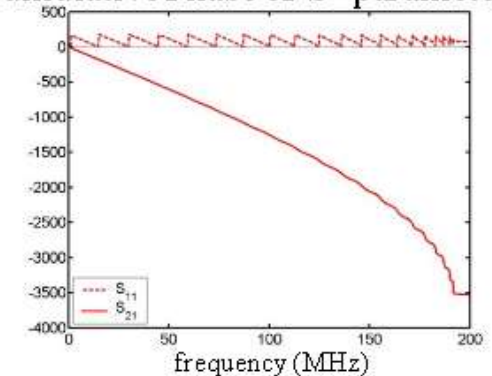
- Toda linha de transmissão física – com condutores elétricos – se comporta como uma linha de transmissão à direita
- Possui característica passa-baixa



Magnitude of S - parameters

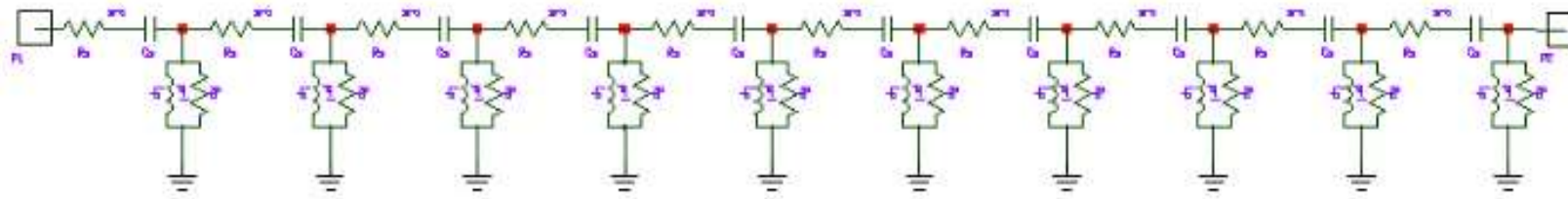


Cumulative Phase of S - parameters

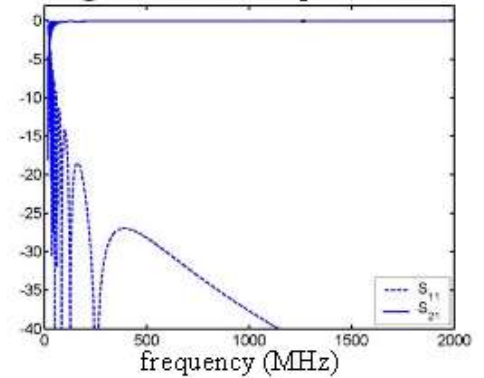


Realização física de uma LTE (2)

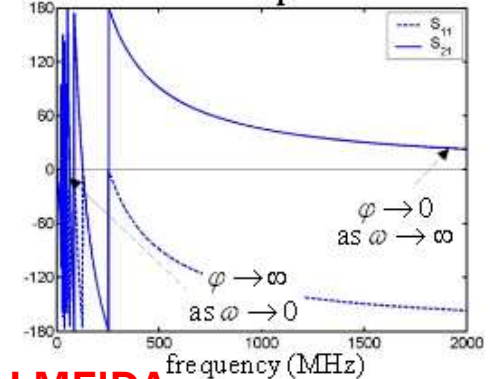
- LTE é uma abstração, pois não há condutores magnéticos na natureza. Entretanto, LTEs são fisicamente realizáveis com circuitos RLC (sob banda limitada)
- Possui característica passa alta
- Comprimento elétrico negativo (devido as ondas contrapropagantes)



Magnitude of S - parameters

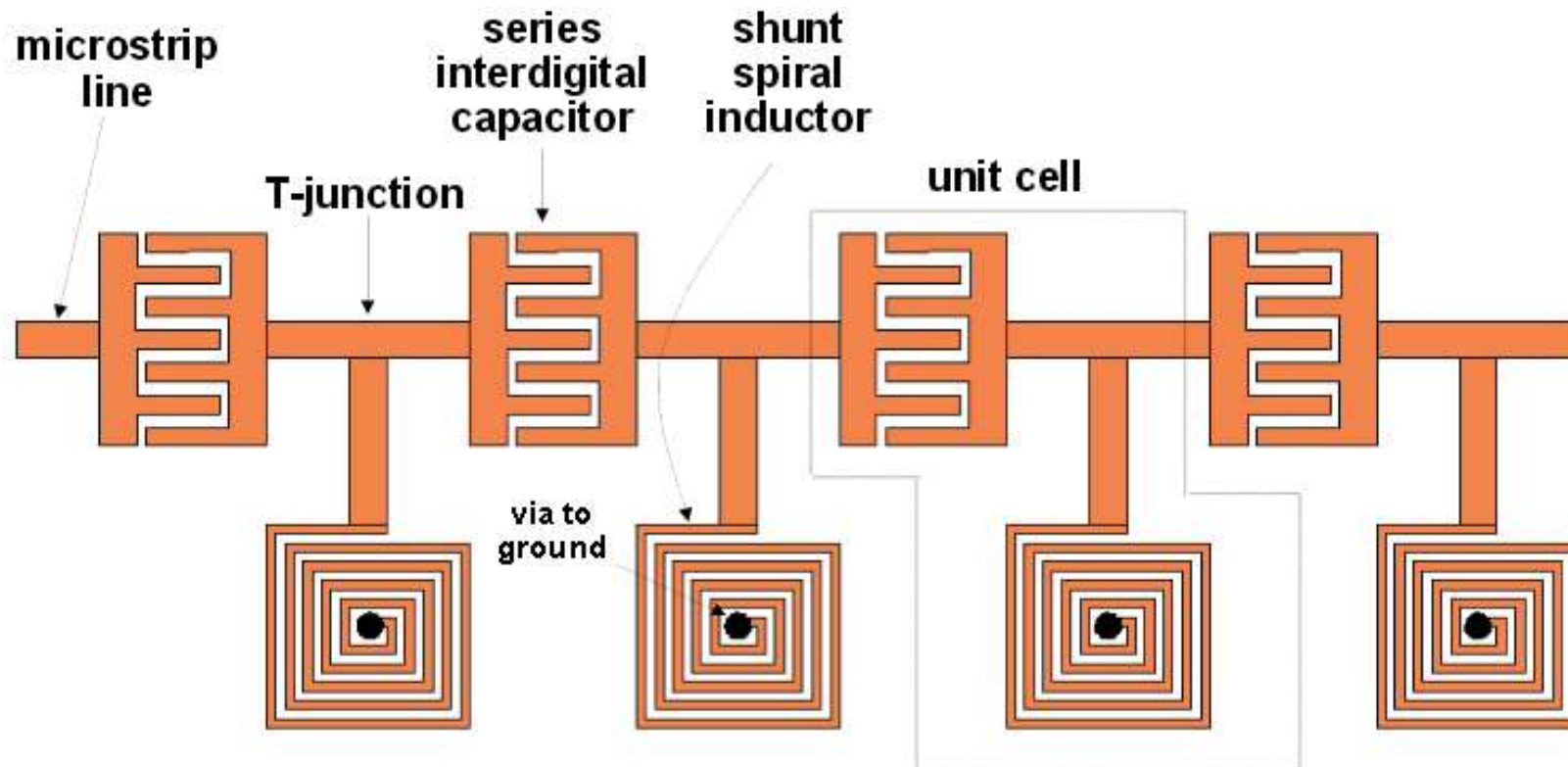


Phase of S - parameters



Realização física de uma LTE (3)

- Largura de banda limitada pelo fator Q



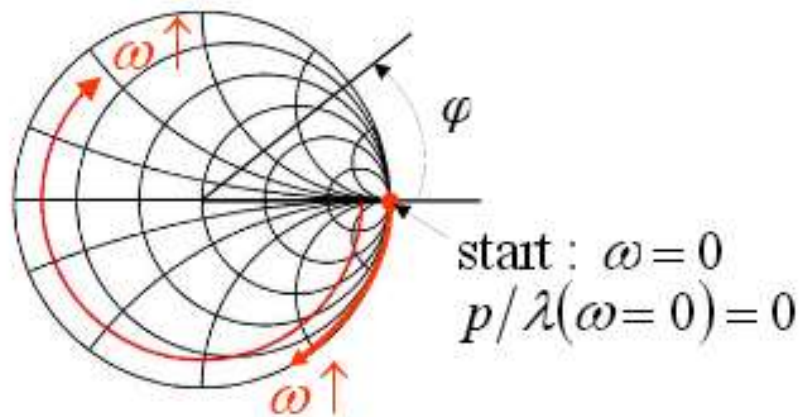
O paradoxo de fase das LTEs

- A fase de uma LTE rotaciona no mesmo sentido que a fase uma LT convencional

$$S_{21} = |S_{21}|e^{j\varphi} = |S_{21}|e^{-j\beta \cdot p} \quad (e^{+j\omega t})$$

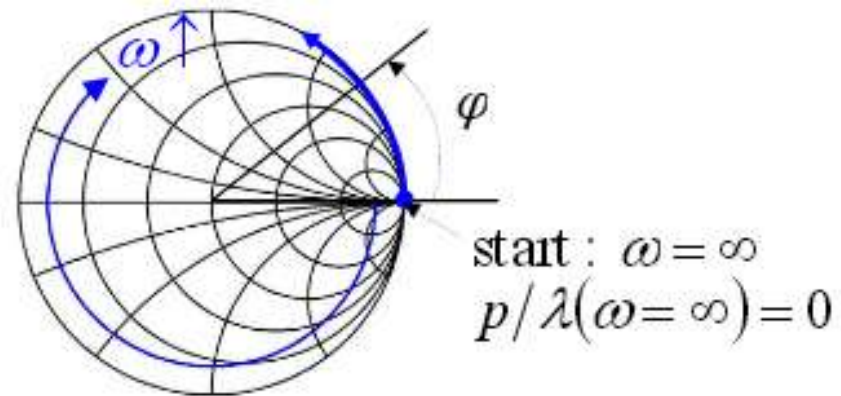
Linhas de transmissão convencionais

$$\beta = \omega\sqrt{LC} \rightarrow \varphi = -\omega\sqrt{LC}p$$



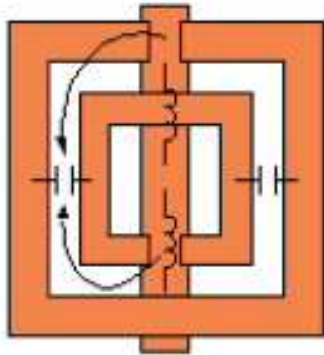
Linhas de transmissão à esquerda

$$\beta = -1/(\omega\sqrt{LC}) \rightarrow \varphi = +p/(\omega\sqrt{LC})$$

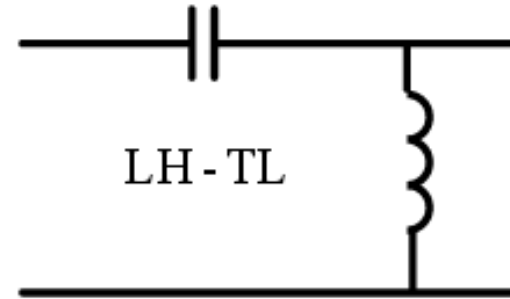


Comparação com superfícies orientadas à esquerda

- LTE apresentam maior banda, menores perdas e menor dispersão que superfícies orientadas à esquerda



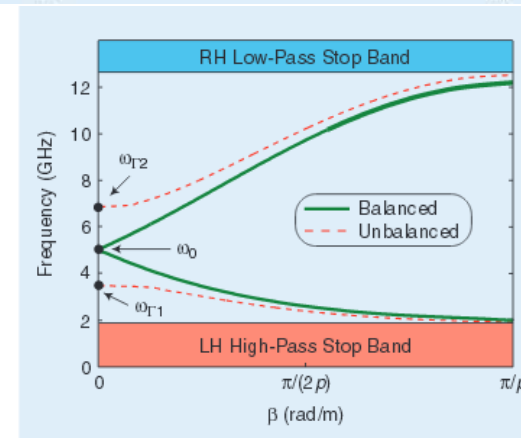
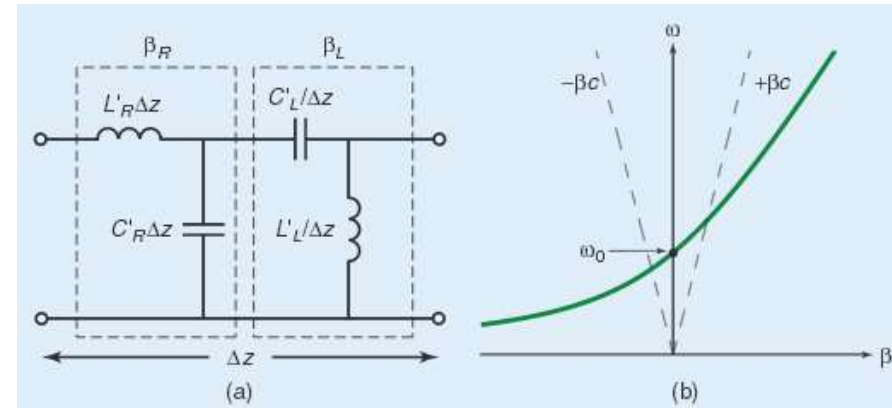
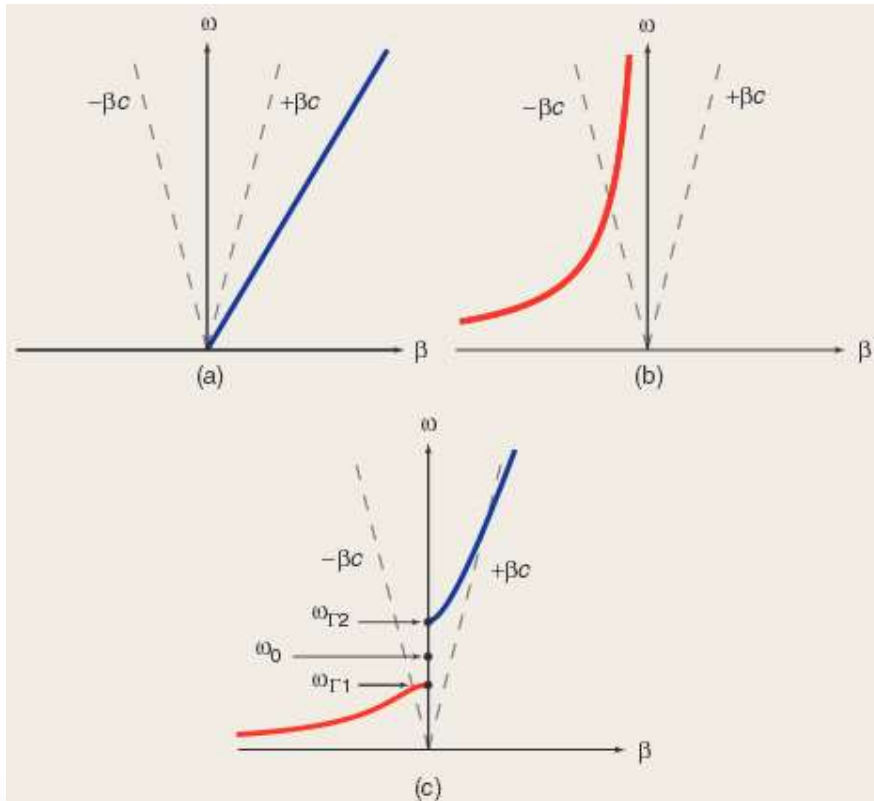
$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad \mu(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2}$$



$$\varepsilon(\omega) = -\frac{1}{\omega^2 L}, \quad \mu(\omega) = -\frac{1}{\omega^2 C}$$

Linhas compósitas (CRLH)

- Combinando ambas as linhas de transmissão, à esquerda e à direita (convencional), podemos obter uma LT compósita

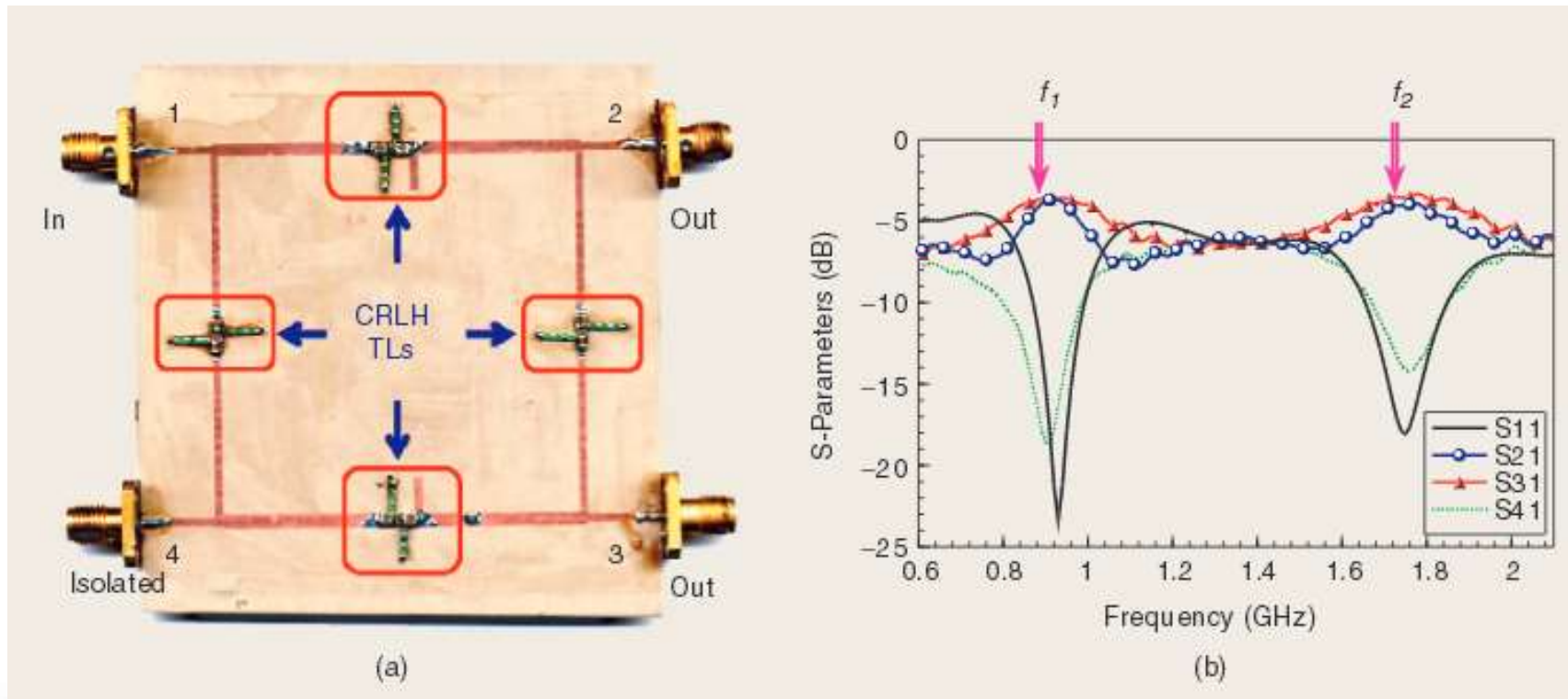


Aplicações de Metamateriais

PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA

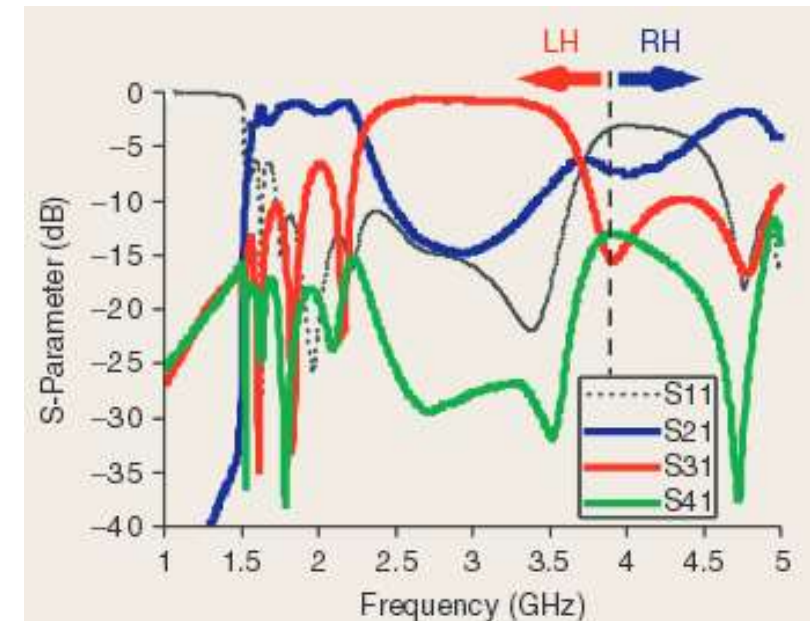
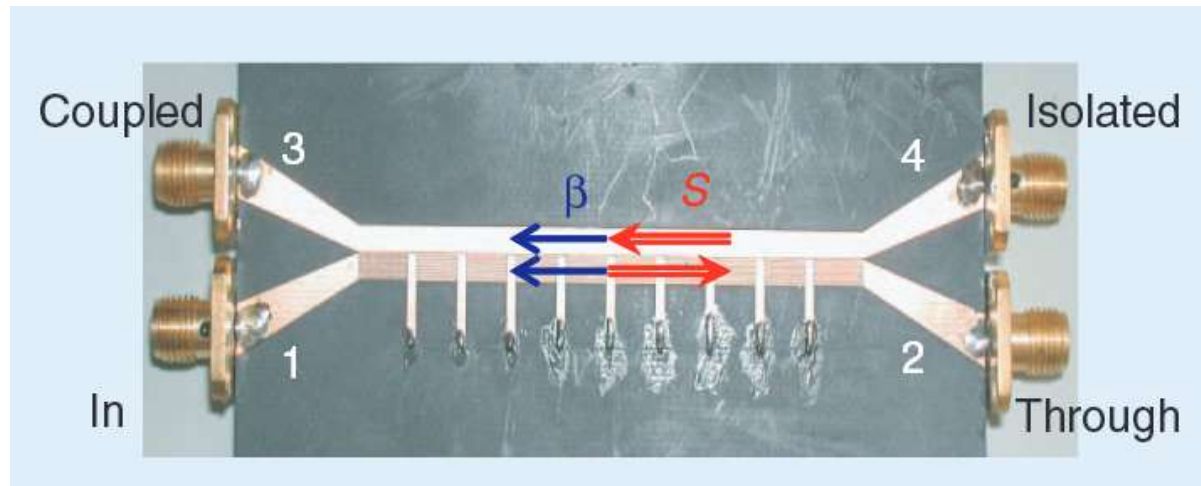
Acopladores direcionais assimétricos

- Menor banda (<10%) comparado as acopladores convencionais (>25%)
- Maior nível de acoplamento (-3 dB) comparado as acopladores convencionais (-10 dB)



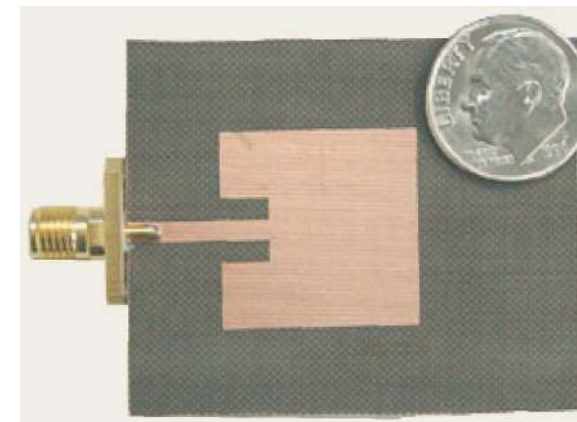
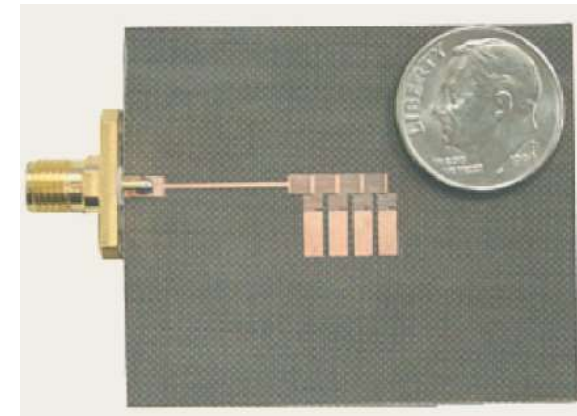
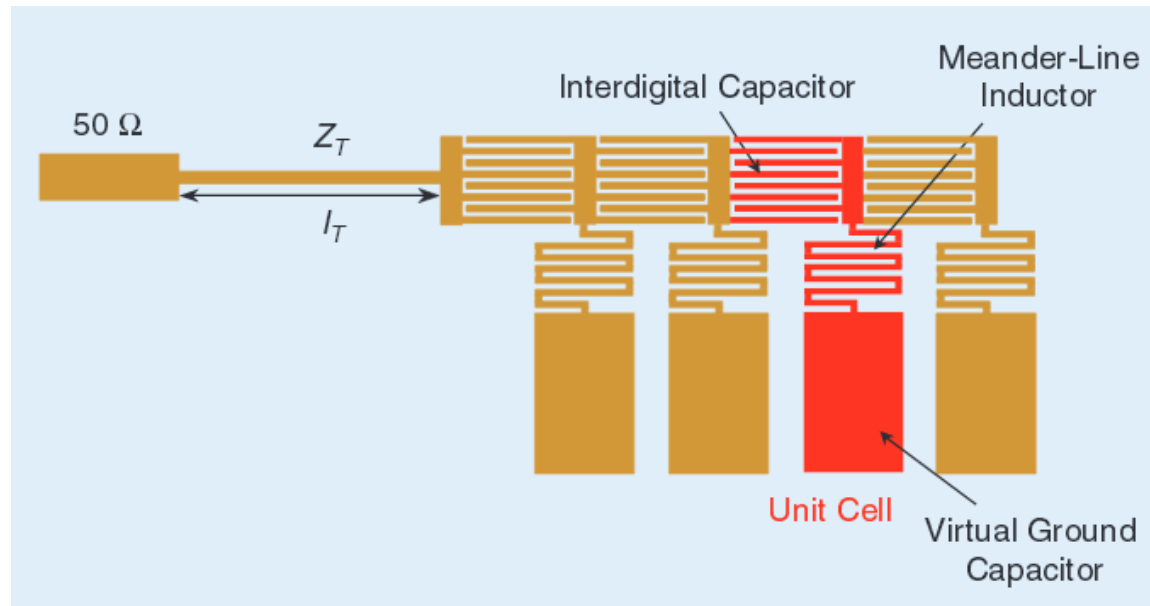
Acopladores direcionais assimétricos (backward coupling)

- Banda (50%)
- Nível de acoplamento (-0.7 dB)



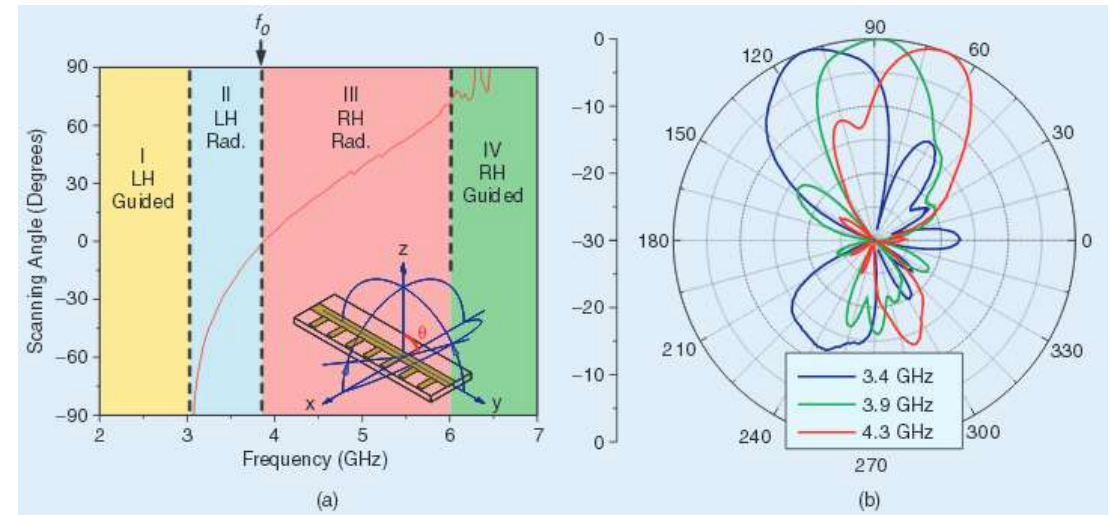
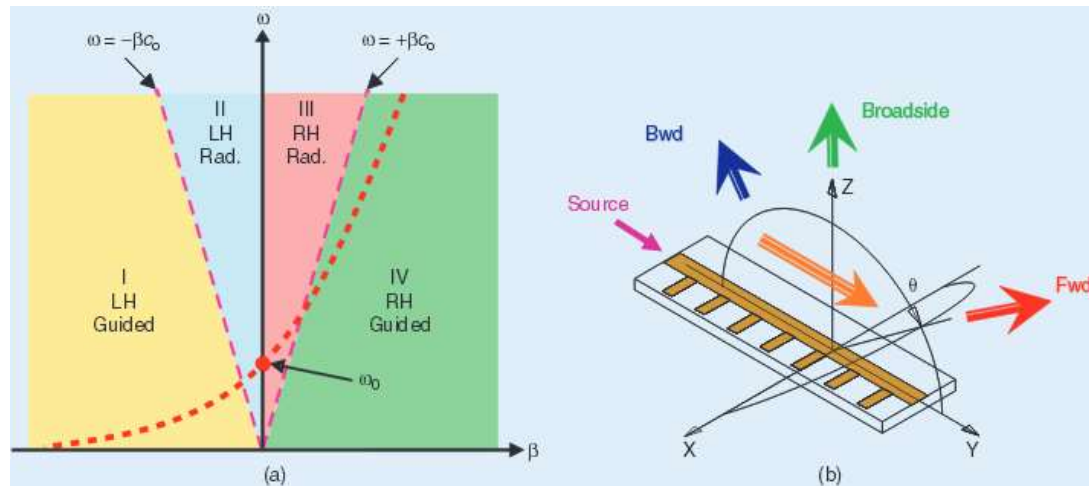
Antena ressonante de ordem zero

- Tamanho independente do comprimento de onda
- Sintonia feita pelas cargas reativas



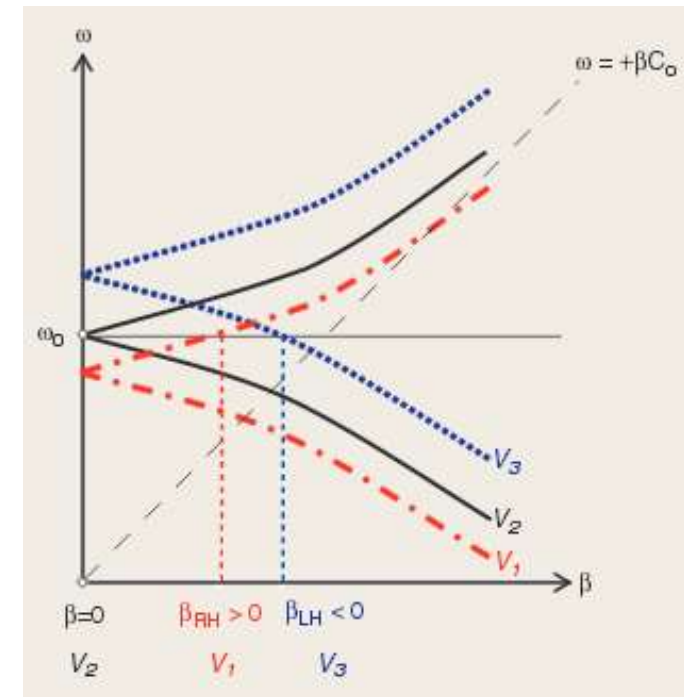
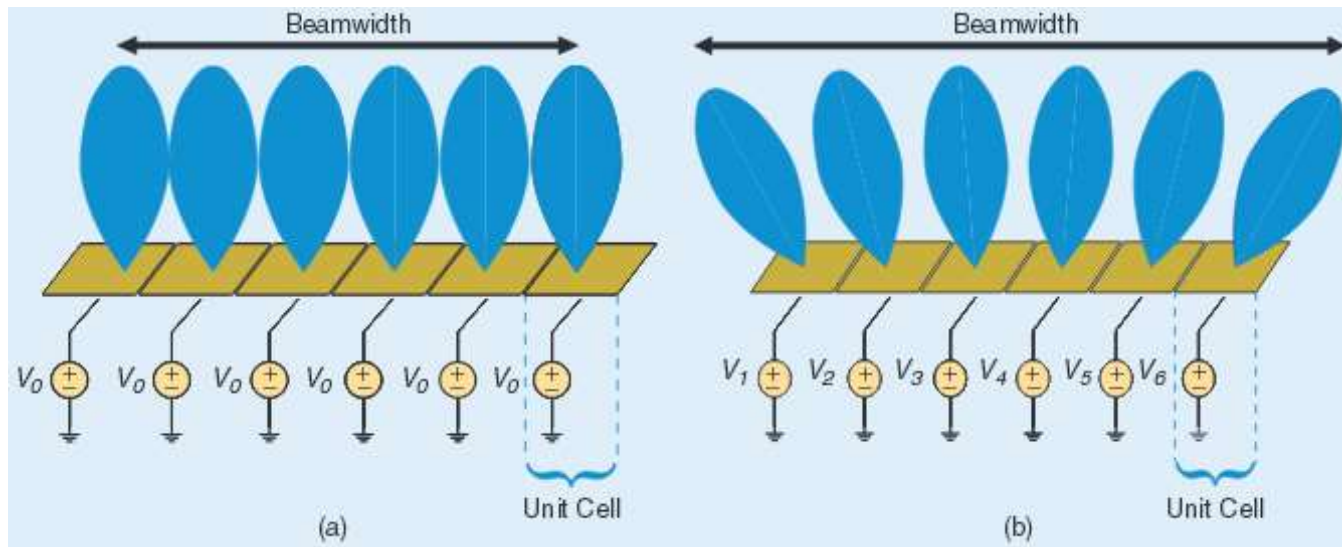
Antena do tipo “leaky wave” (LW)

- Uma linha de transmissão compósita (CRLH) pode ser usada como uma antena do tipo “leaky wave” de forma eficiente se ela estiver casada com a impedância do ar

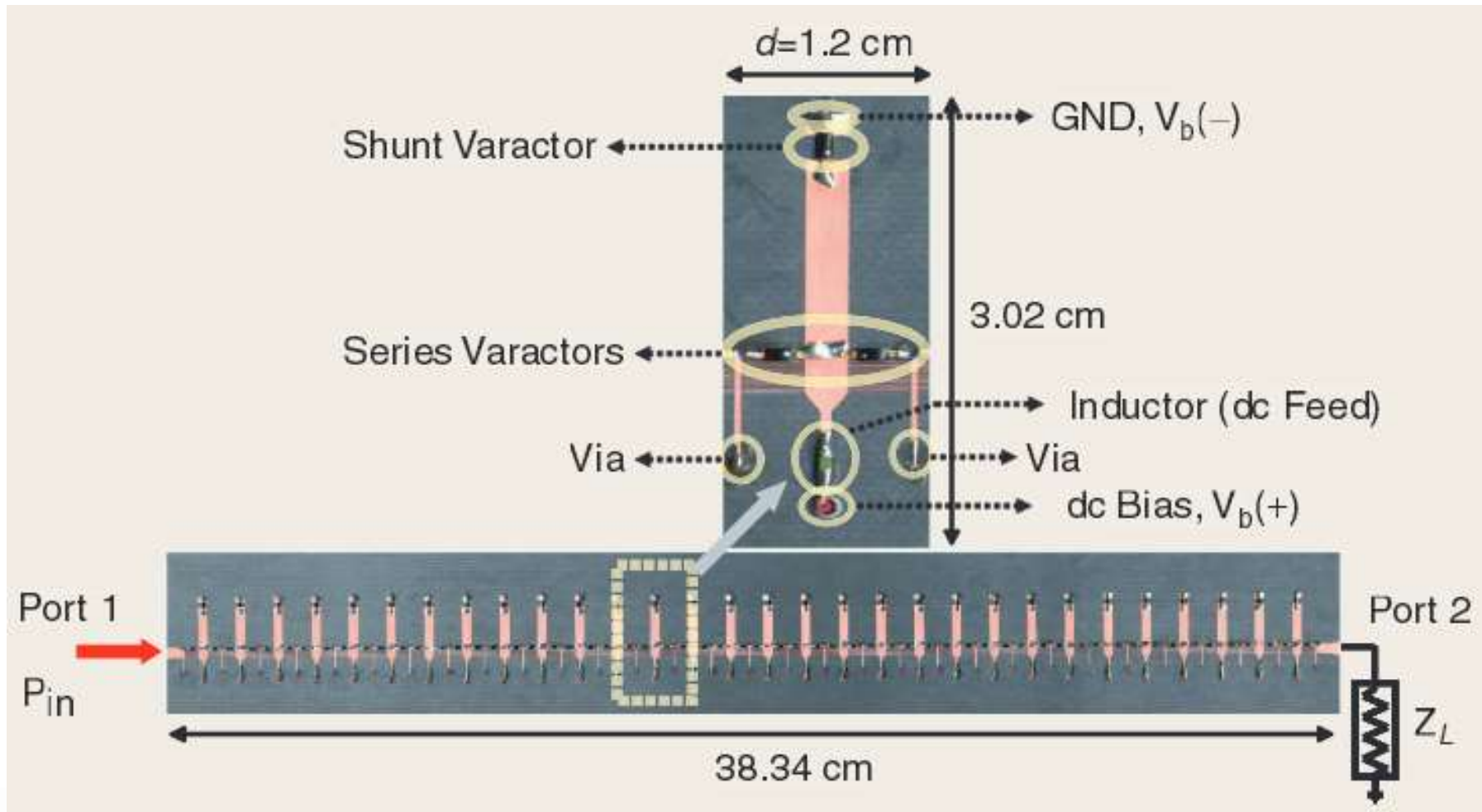


Controle eletrônico de antenas LW

- Controlando eletronicamente as cargas reativas, é possível controlar a largura do feixe
- As dimensões físicas da antena tornam-se independente do comprimento de onda



Realização física de antena LW



PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA

**Obrigado pela atenção!
Até a próxima aula...**