



Introdução aos metamateriais eletromagnéticos

Prof. Dr. Gláucio Lima Siqueira



Instituto de Inovação
em Metamateriais

PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA

Apresentação por Jorge Virgílio 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 – Homogeneização de estruturas periódicas

Ementa (II)

- **Parte 2 – Fenômeno e aplicações de metamateriais**
 - Tópico 9 – Teoria dos metamateriais
 - 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

Tópico 7

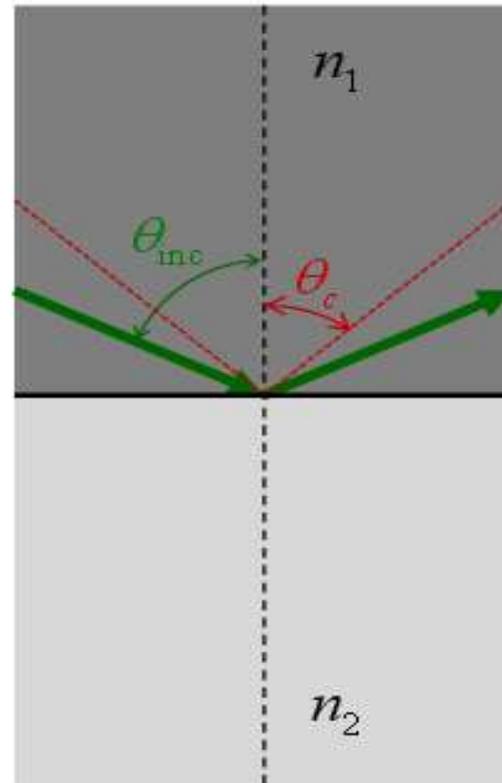
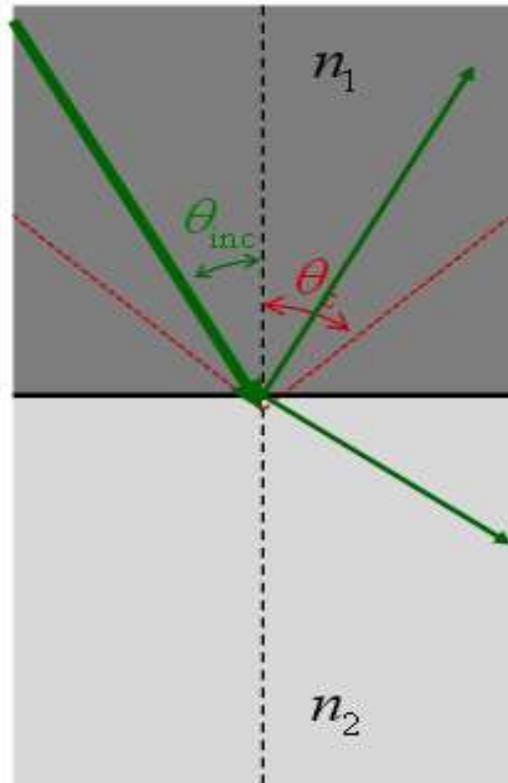
Ressonância de modo guiado

- Física da Ressonância de Modo Guiado (RMG)
- Filtros RMG
- Projetos e Aplicações
- Materiais em Engenharia

Física da ressonância de modo guiado

Ângulo crítico e reflexão total

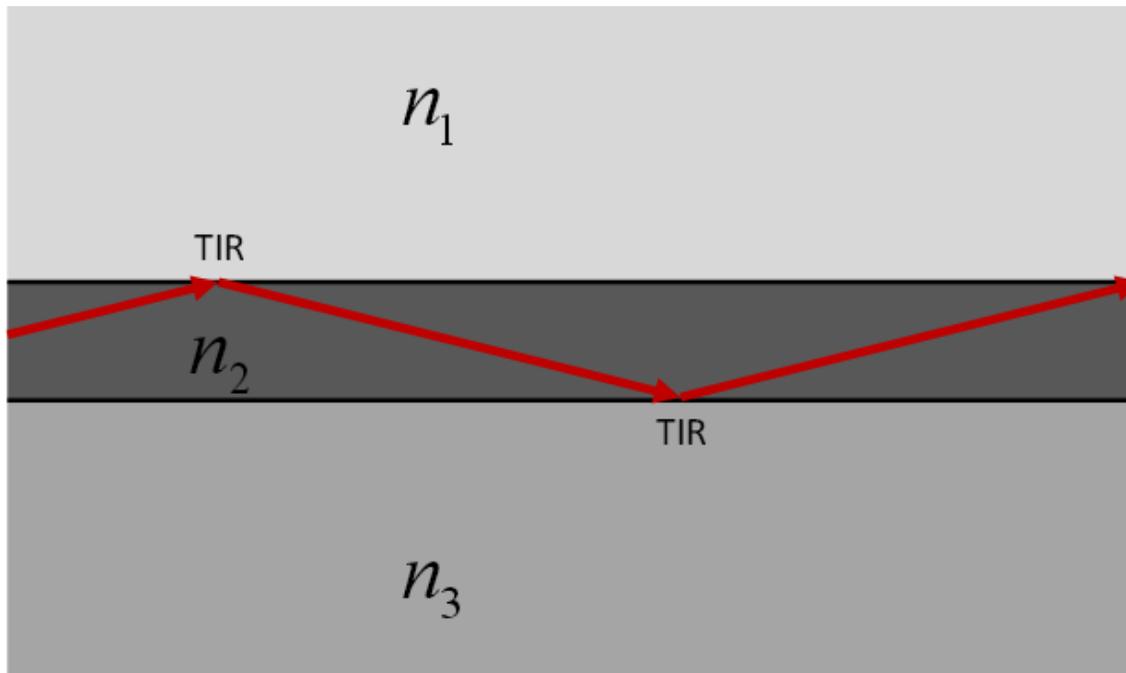
- Uma onda eletromagnética incidindo em um meio de índice de refração menor possui um ângulo de reflexão total (ângulo crítico)



$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$
$$n_1 > n_2$$

Guia de onda dielétrico

- Um guia de onda dielétrico é formado por um material dielétrico entre outros dois materiais dielétricos de índice de refração menor

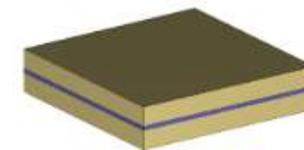


Condições

$$n_2 > n_1$$

e

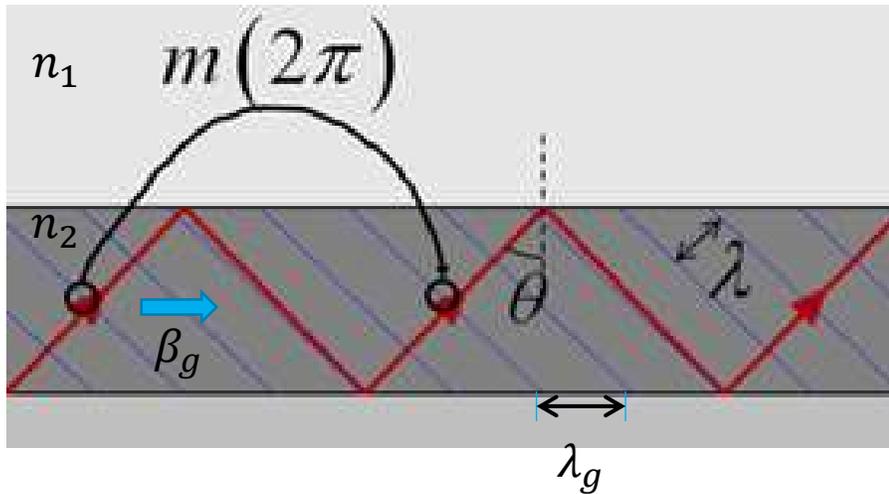
$$n_2 > n_3$$



“ slab waveguide”

Análise de traçado de raios

- A fase de uma volta completa de um raio deve ser um múltiplo de 2π
- Somente certos ângulos podem propagar-se dentro do guia de onda



$$\lambda = \lambda_g \text{sen}\theta$$

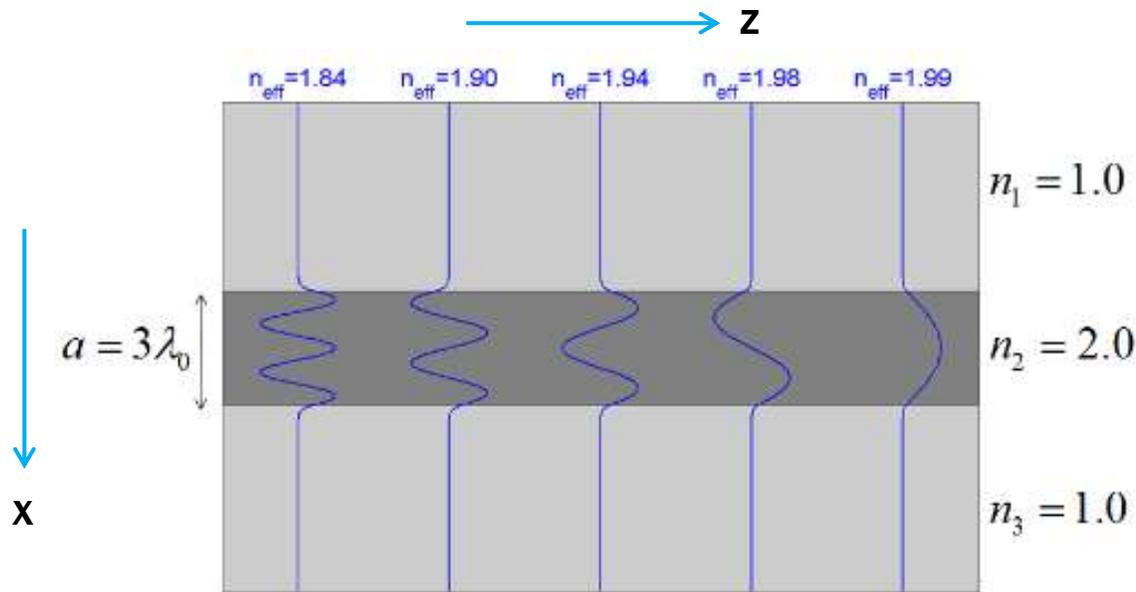
$$\beta_g = \frac{2\pi}{\lambda_g} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{\lambda_0}{\lambda_g} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{\lambda}{\lambda_g} = k_0 n_2 \text{sen}\theta$$

$$n_{eff} = n_2 \text{sen}\theta$$

$$\beta_g = k_0 n_{eff}$$

Modos propagantes

- A geometria e as soluções dos modos propagantes num guia dielétrico são:



Neste exemplo:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{2}$$



$$\text{sen}\theta = \sqrt{1 - \frac{m^2}{144}}$$

$$a = m \frac{\lambda_x}{2} \rightarrow k_x = m \frac{\pi}{a}$$

$$k_z^2 = k_x^2 + k_z^2 = k_x^2 + \beta_g^2$$

$$\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{1}{\lambda_x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda_g}\right)^2$$

$$\text{sen}\theta = \sqrt{1 - \frac{m^2 \lambda^2}{4a^2}}$$

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \frac{1}{2} = 30^\circ$$

Ângulos permitidos e índices efetivos

| m | n(efetivo) | Teta (o) |
|----|------------|----------|
| 1 | 1,993 | 84,9 |
| 2 | 1,972 | 79,3 |
| 3 | 1,936 | 72,0 |
| 4 | 1,886 | 66,5 |
| 5 | 1,818 | 59,4 |
| 10 | 1,106 | 33,6 |

Redes de difração

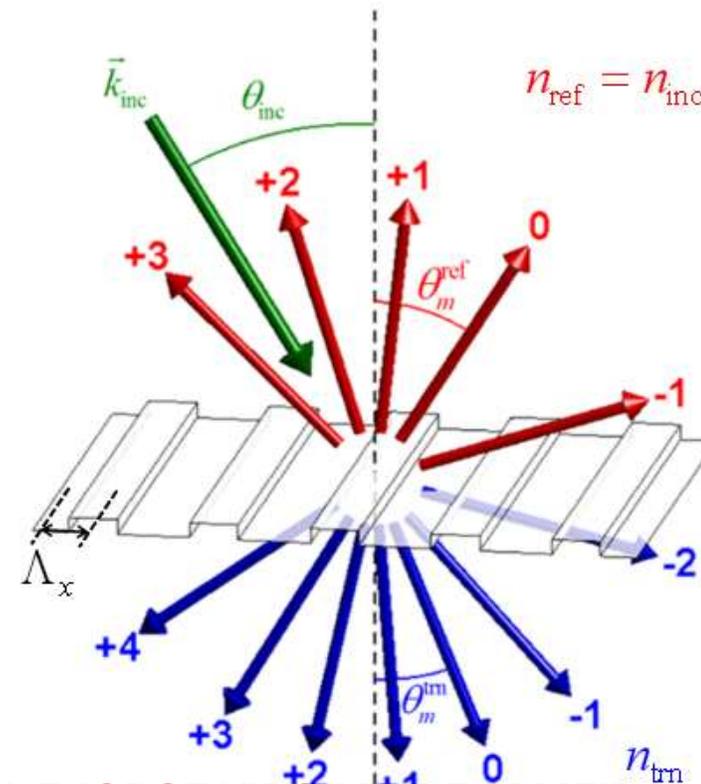
- O ângulo dos diferentes modos difratados são relacionados com o comprimento de onda e o vetor de rede pela equação de rede
- A equação da rede APENAS prediz a direção dos modos, não a potência contida neles

Região de reflexão

$$n_{\text{ref}} \sin[\theta(m)] = n_{\text{inc}} \sin \theta_{\text{inc}} - m \frac{\lambda_0}{\Lambda_x}$$

Região de transmissão

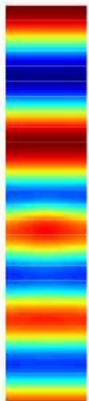
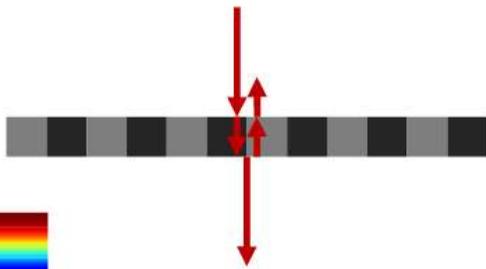
$$n_{\text{trn}} \sin[\theta(m)] = n_{\text{inc}} \sin \theta_{\text{inc}} - m \frac{\lambda_0}{\Lambda_x}$$



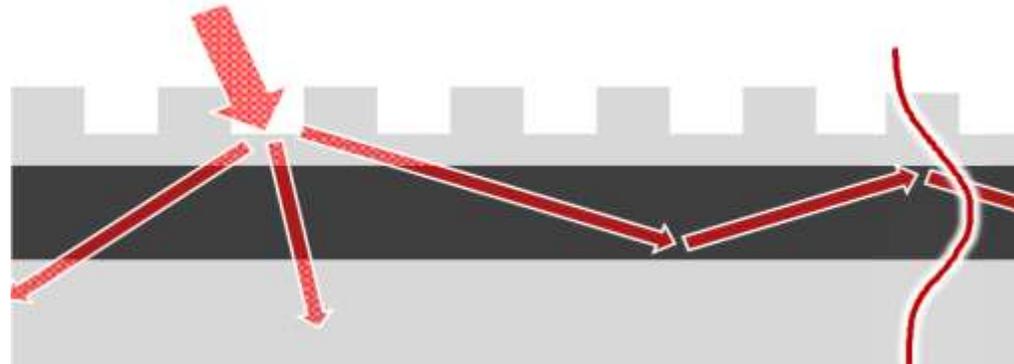
RMG = Difração + Guia de Onda

- O que acontece quando uma rede de difração e um guia dielétrico são aproximados e o ângulo de um modo refratado se iguala ao ângulo de um modo guiado?

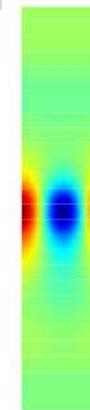
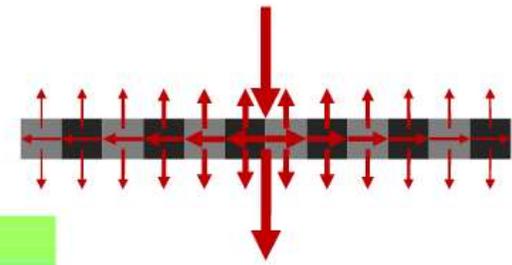
Longe da Ressonância



Longe da ressonância, a estrutura exibe uma resposta de “fundo” equivalente a uma camada homogênea de dielétrico. (Múltiplas camadas)



Na Ressonância



Quando modos difratados pela rede periódica se acoplam a modos de um guia de onda, eles ficam “aprisionados” no guia e lentamente “vazam” para o exterior do guia, interferindo com as ondas incidente e transmitida gerando uma resposta de filtragem.

Regiões de RMG (1)

Equação de Rede

$$n_2 \sin[\theta(m)] = n_1 \sin \theta_{\text{inc}} - m \frac{\lambda_0}{\Lambda} \sin \phi$$

Modos Guiados

$$\beta_m = k_0 n_{\text{eff}} = k_0 n_2 \sin[\theta(m)]$$

Assim

$$n_{\text{eff}} = n_1 \sin \theta_{\text{inc}} - m \frac{\lambda_0}{\Lambda} \sin \phi$$

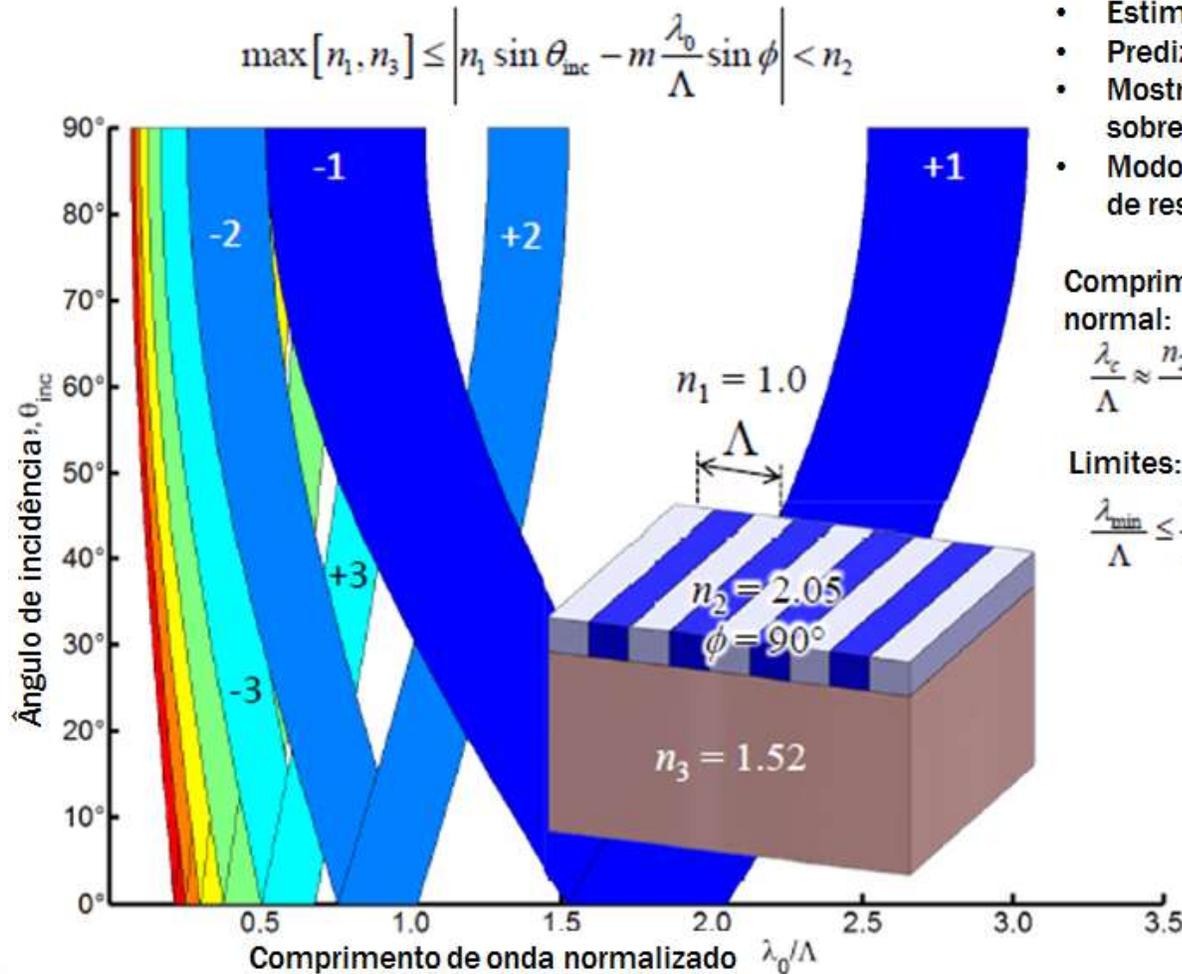
Condição para n_{eff} representar um modo guiado

$$\max[n_1, n_3] \leq n_{\text{eff}} < n_2$$

Combinando as duas equações acima descreveremos as regiões de ressonância para GMR.

$$\max[n_1, n_3] \leq \left| n_1 \sin \theta_{\text{inc}} - m \frac{\lambda_0}{\Lambda} \sin \phi \right| < n_2$$

Regiões de RMG (2)



- Estima faixas de frequências de ressonância
- Prediz a sensibilidade a ângulos de incidência
- Mostra como ressonâncias de altas ordens se sobrepõem
- Modos de ordem zero não produzem efeitos de ressonância

Comprimento de onda central para incidência normal:

$$\frac{\lambda_c}{\Lambda} \approx \frac{n_2 + \max[n_1, n_3]}{2|m| \sin \phi}$$

Limites:

$$\frac{\lambda_{\min}}{\Lambda} \leq \frac{\lambda_0}{\Lambda} < \frac{\lambda_{\max}}{\Lambda}$$

$$\frac{\lambda_{\min}}{\Lambda} = \begin{cases} \frac{n_1 \sin \theta_{\text{inc}} - \max[n_1, n_3]}{m \sin \phi} & m < 0 \\ \frac{n_1 \sin \theta_{\text{inc}} + \max[n_1, n_3]}{m \sin \phi} & m > 0 \end{cases}$$

$$\frac{\lambda_{\max}}{\Lambda} = \begin{cases} \frac{n_1 \sin \theta_{\text{inc}} - n_2}{m \sin \phi} & m < 0 \\ \frac{n_1 \sin \theta_{\text{inc}} + n_2}{m \sin \phi} & m > 0 \end{cases}$$

Vantagens e desvantagens

- Vantagens:
 - Só usam dielétricos para perdas muito baixas
 - Resposta extremamente fortes dos dielétricos
 - Potencialmente melhor em altas potências do que usar metais
- Desvantagens:
 - Maiores e mais pesadas do que estruturas metálicas
 - Largura de faixa e campo de visão limitados comparado com dispositivos metálicos
 - Resposta muito sensível às propriedades do material e às deformações estruturais

Filtros RMG

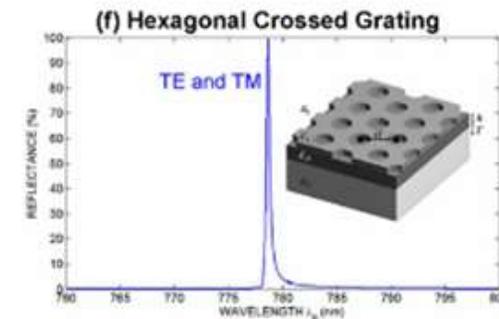
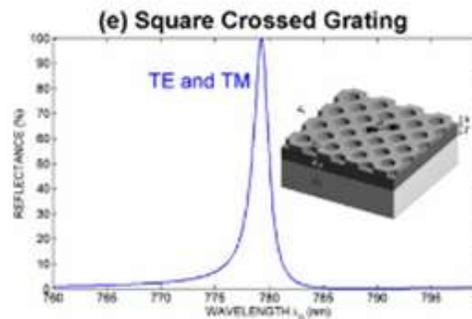
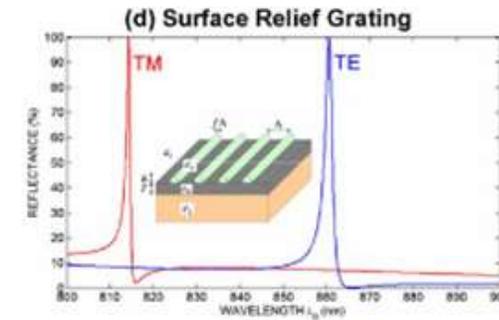
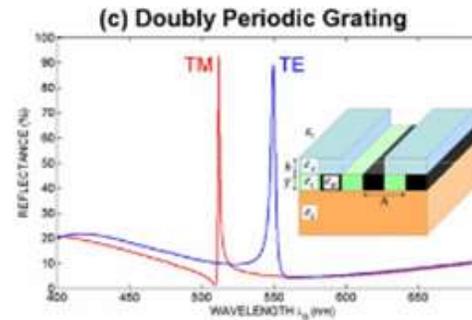
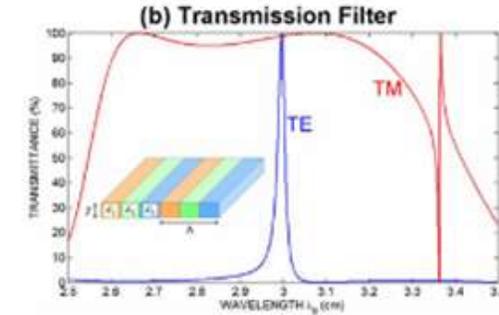
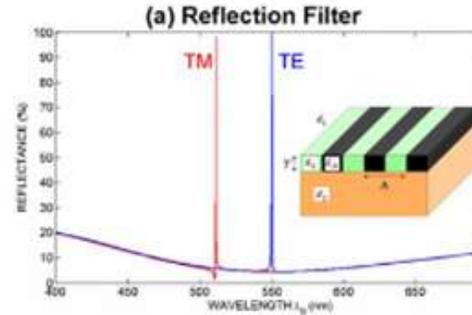
Tipos de filtros

Um filtro RMG é ao mesmo tempo uma rede de difração e um guia dielétrico

Uma ressonância ocorre quando um modo difratado casa com um modo guiado

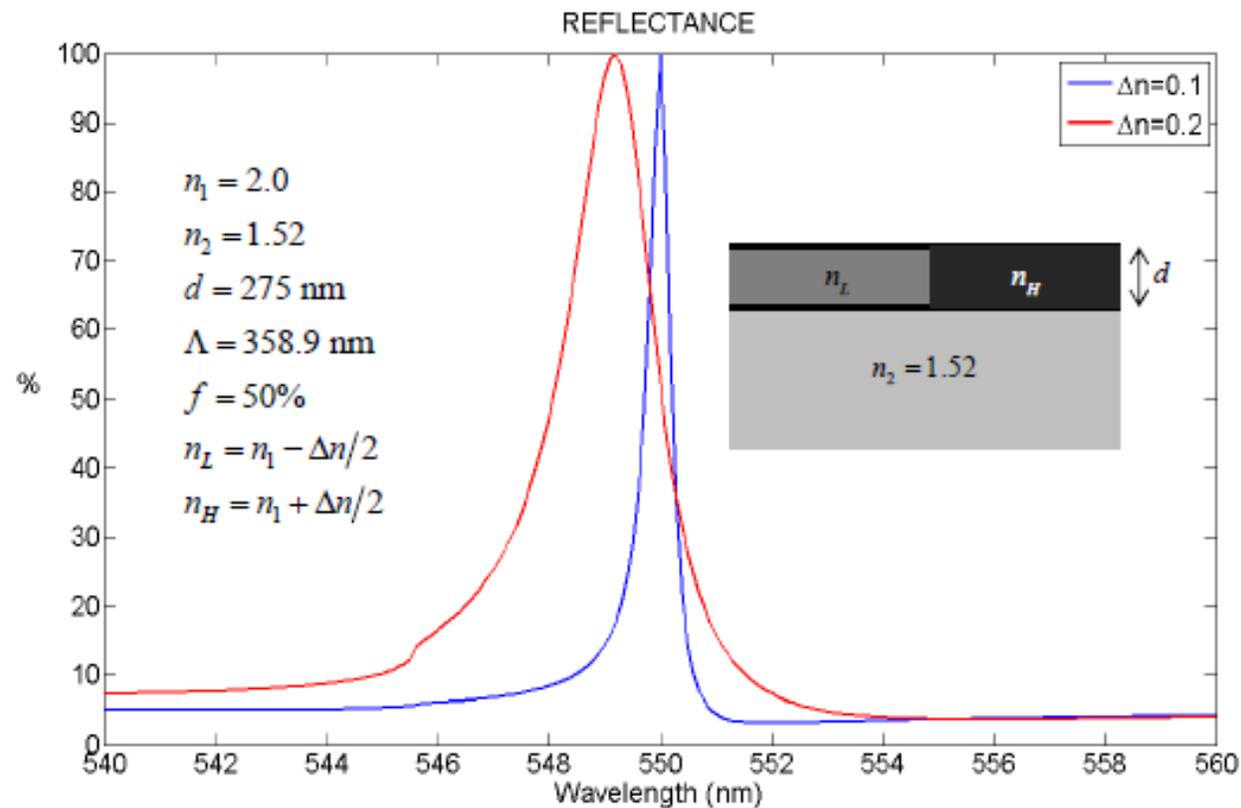
Longe da ressonância o dispositivo se comporta como estrutura multicamada

Na ressonância o dispositivo reverte a resposta de fundo (literalmente falando)



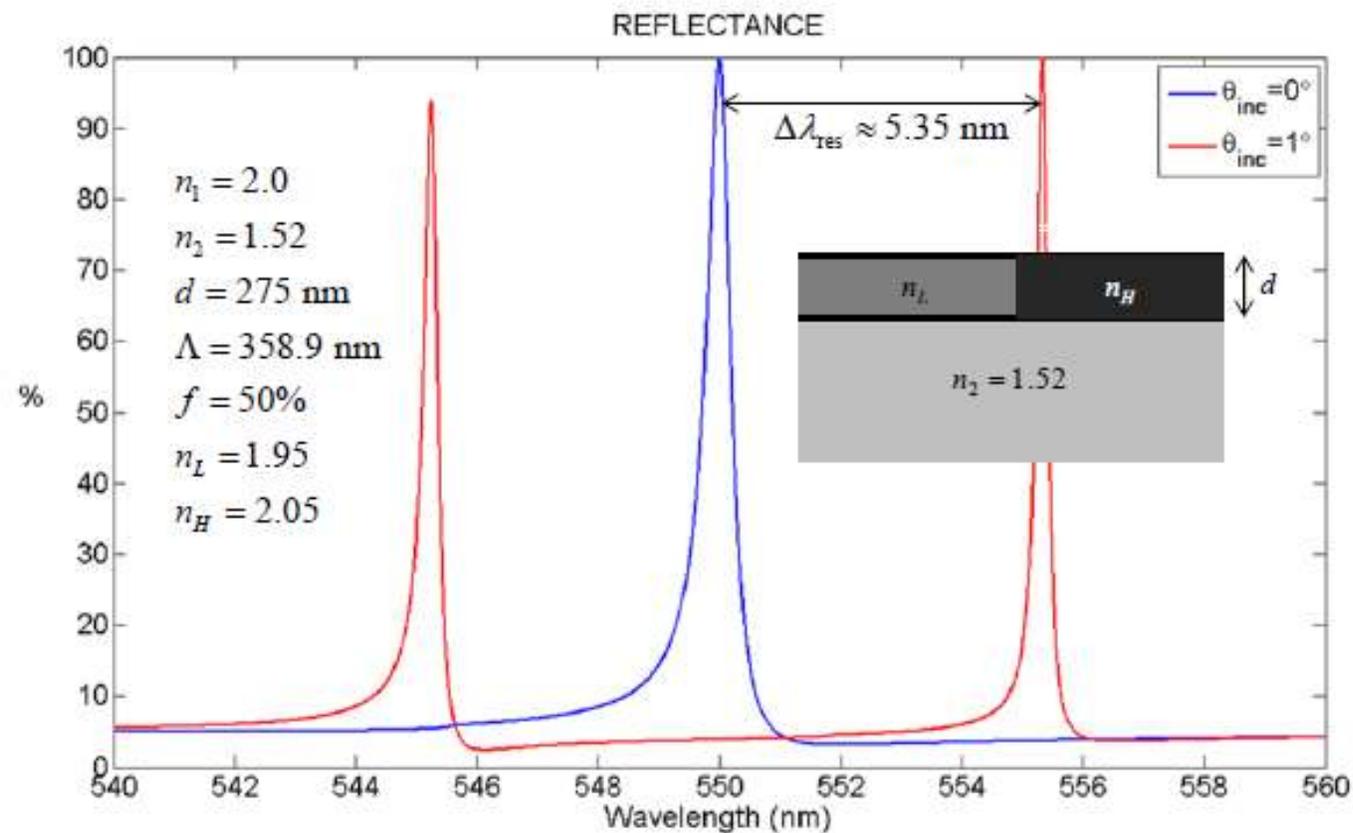
Efeito do contraste do índice

- A largura da ressonância se torna mais estreita a medida que o contraste de índices diminui



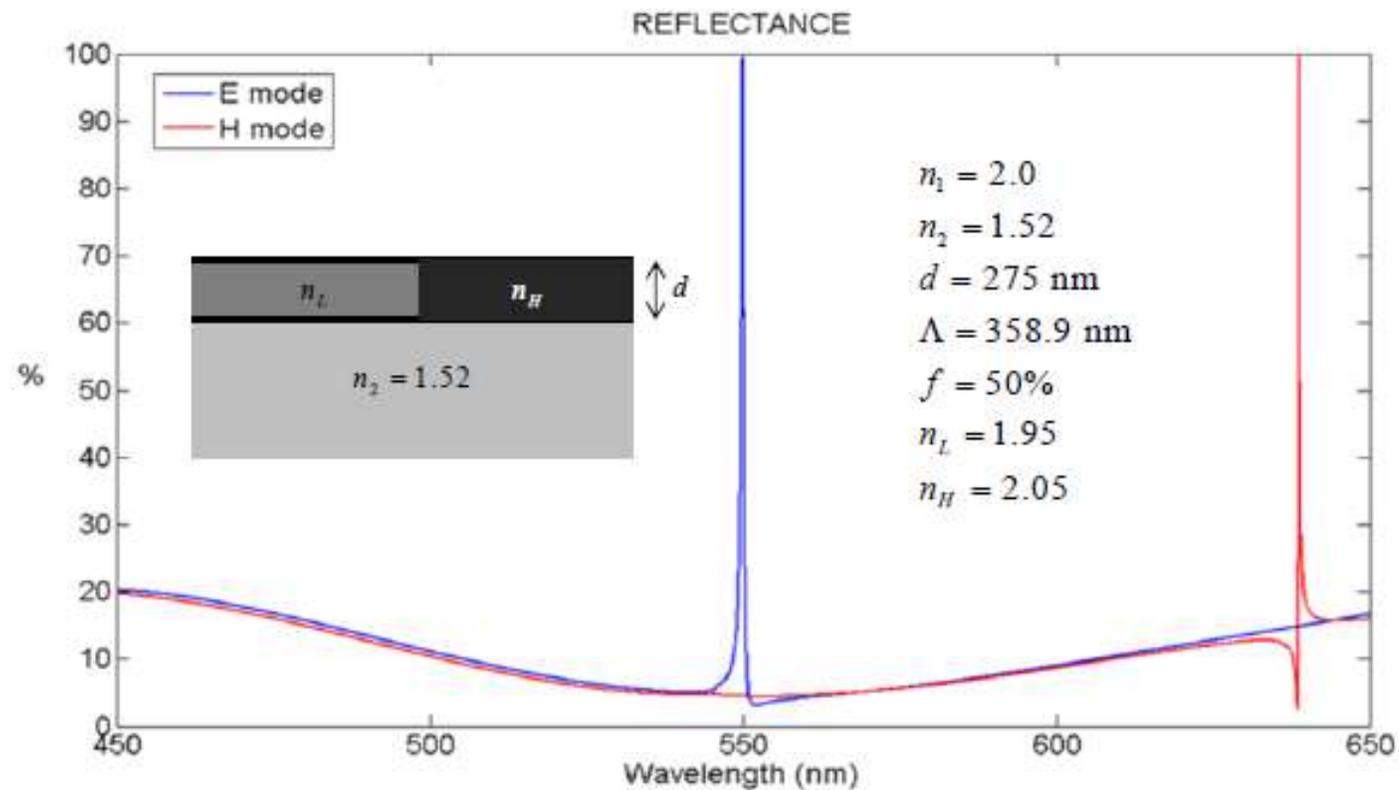
Sensibilidade ao ângulo de incidência

- Desviar da incidência normal, separa a ressonância. Porém, altera a resposta de fundo

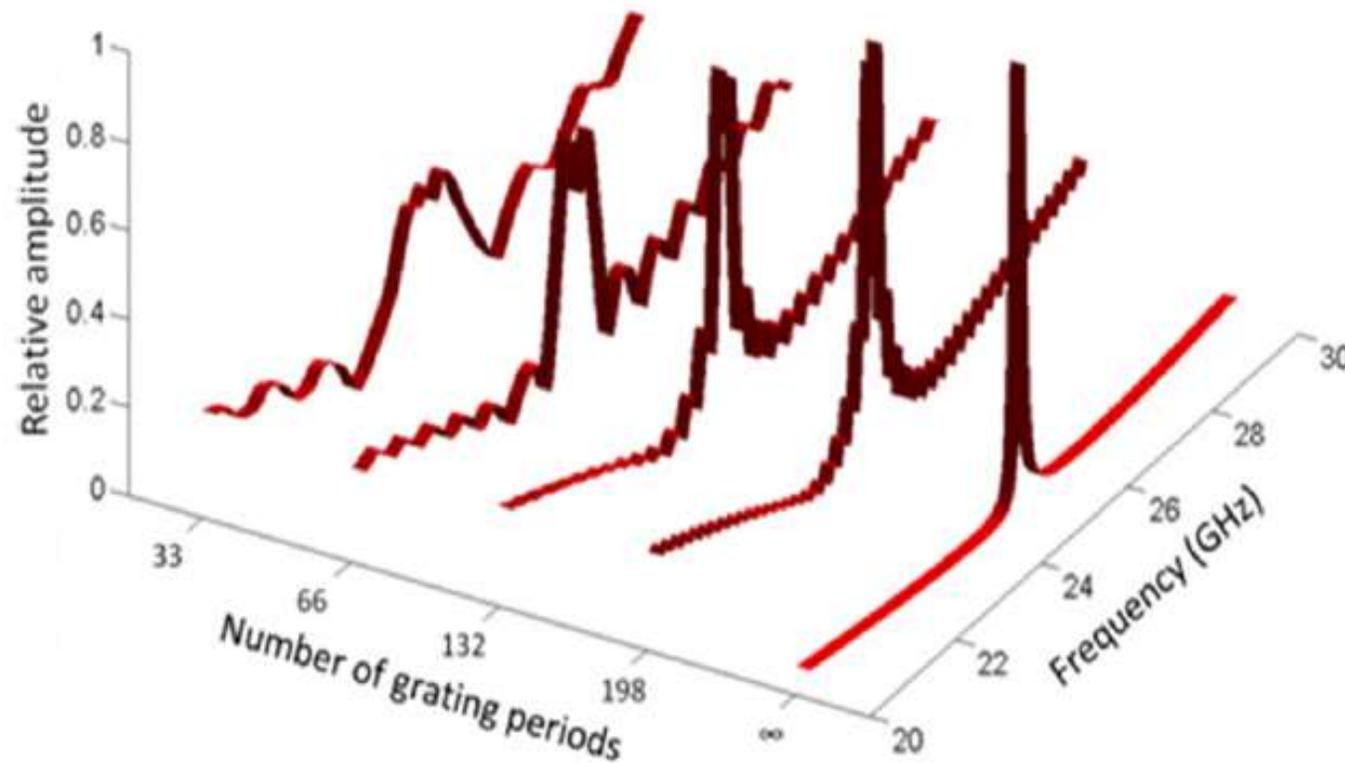


Sensibilidade à polarização

- A polarização pode ter um efeito dramático na resposta de um filtro RMG

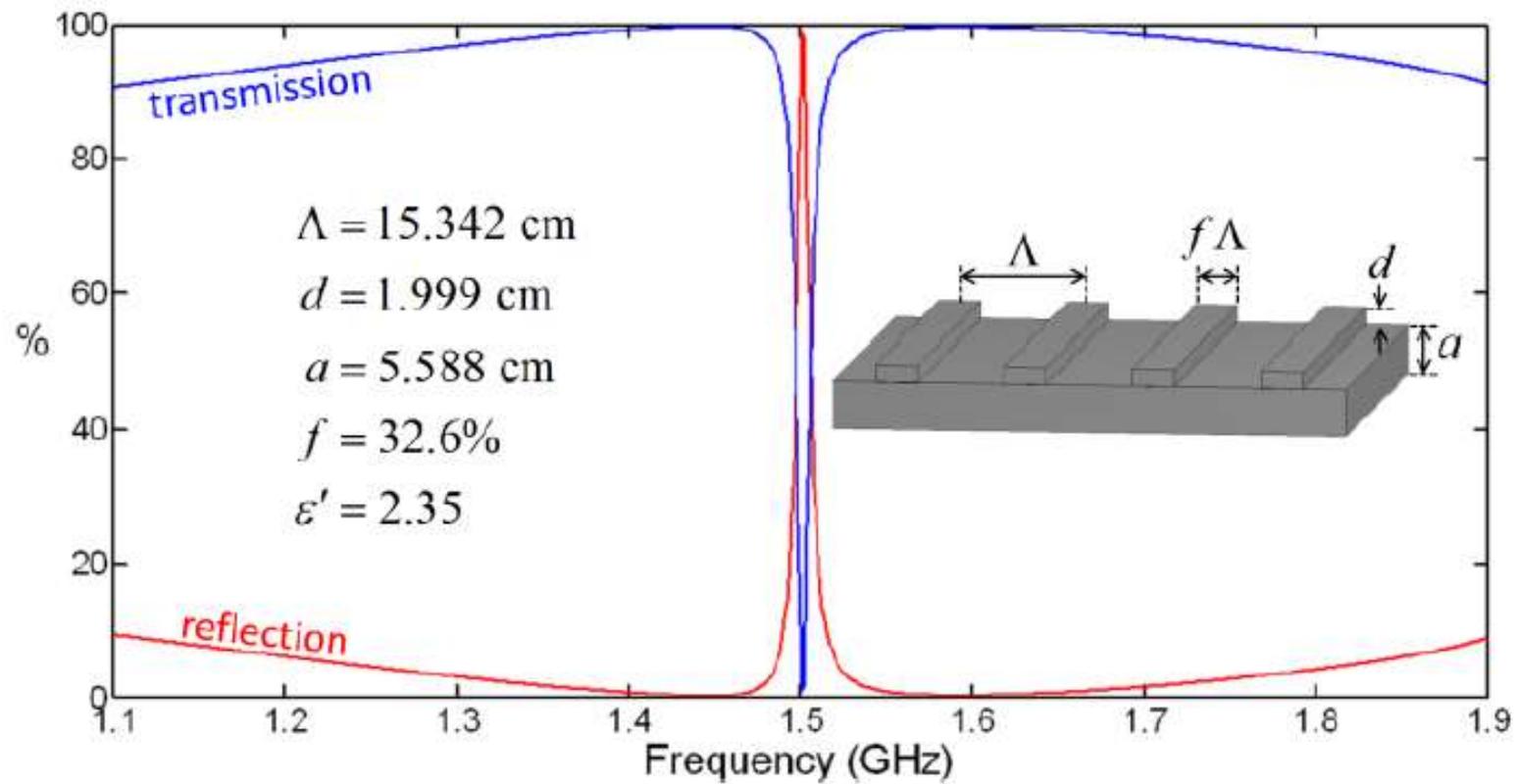


Efeito de um número finito de períodos



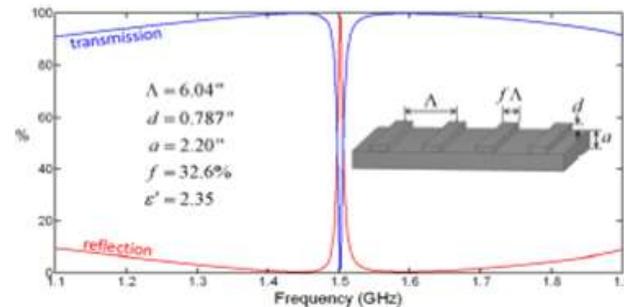
Projetos e aplicações

Filtros RMG monolíticos



Escalabilidade

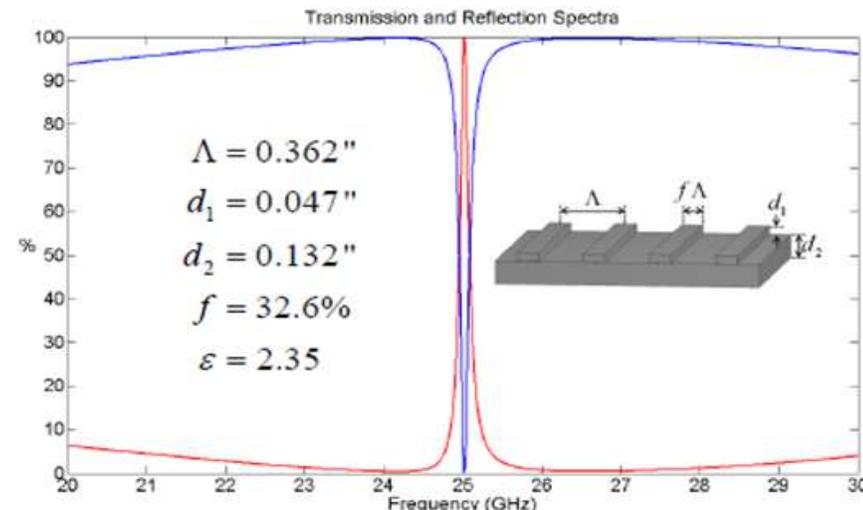
- As equações de Maxwell não têm nenhuma escala de comprimento fundamental de modo que projetos podem ser feitos para operar em diferentes frequências apenas escalando as dimensões



Fator de Escala para operação em 25 GHz

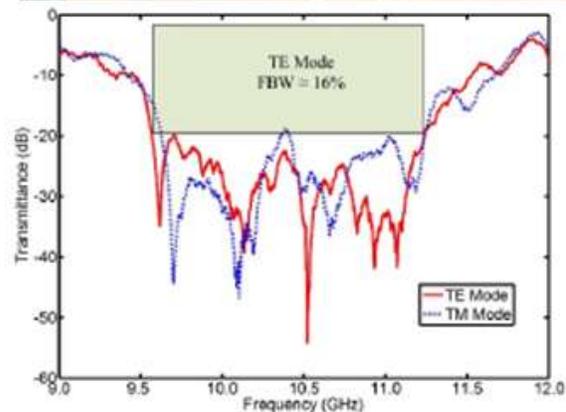
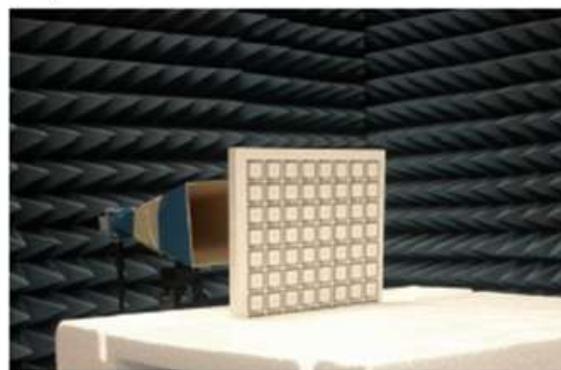
$$s = \frac{1.5 \text{ GHz}}{25 \text{ GHz}} = 0.06$$

Para escalar o projeto, multiplique todas as dimensões físicas por este número.



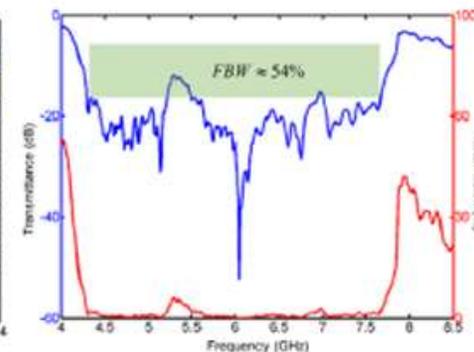
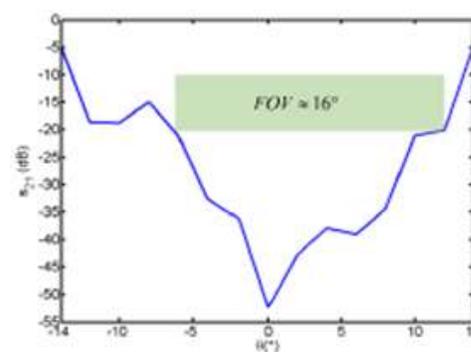
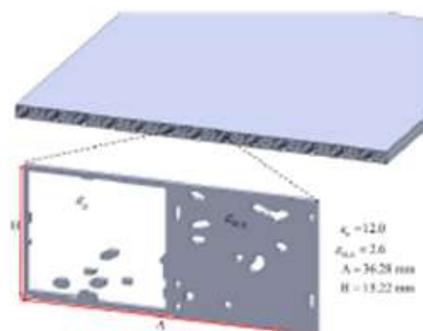
Filtros RMG banda larga em micro-ondas

FRMG usinado



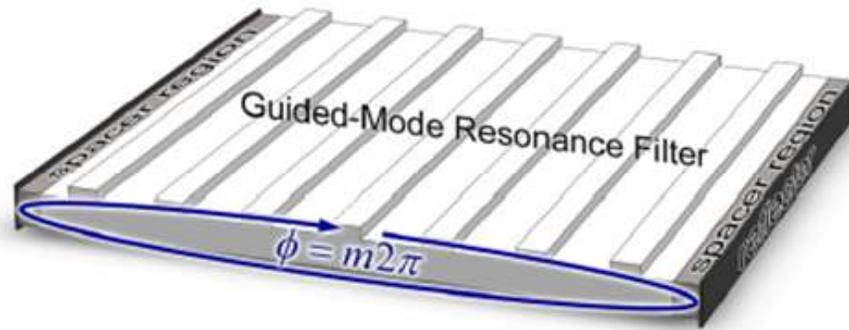
J. H. Barton, C. R. Garcia, E. A. Berry, R. G. May, D. T. Gray, R. C. Rumpf, "All-Dielectric Frequency Selective Surface for High Power Microwaves," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014.

FRMG impresso 3D



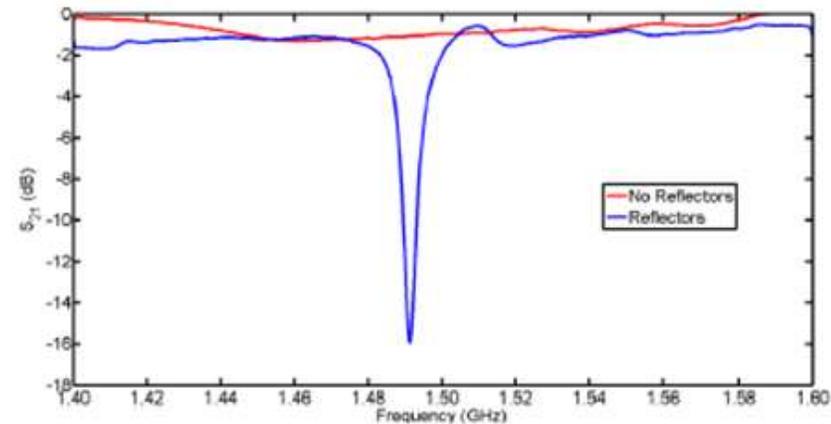
J. H. Barton, C. R. Garcia, E. A. Berry, R. Salas, R. C. Rumpf, "3D Printed All-Dielectric Frequency Selective Surface with Large Bandwidth and Field-of-View," IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 63, No. 3, pp. 1032-1039, 2015.

Dispositivos com menos períodos

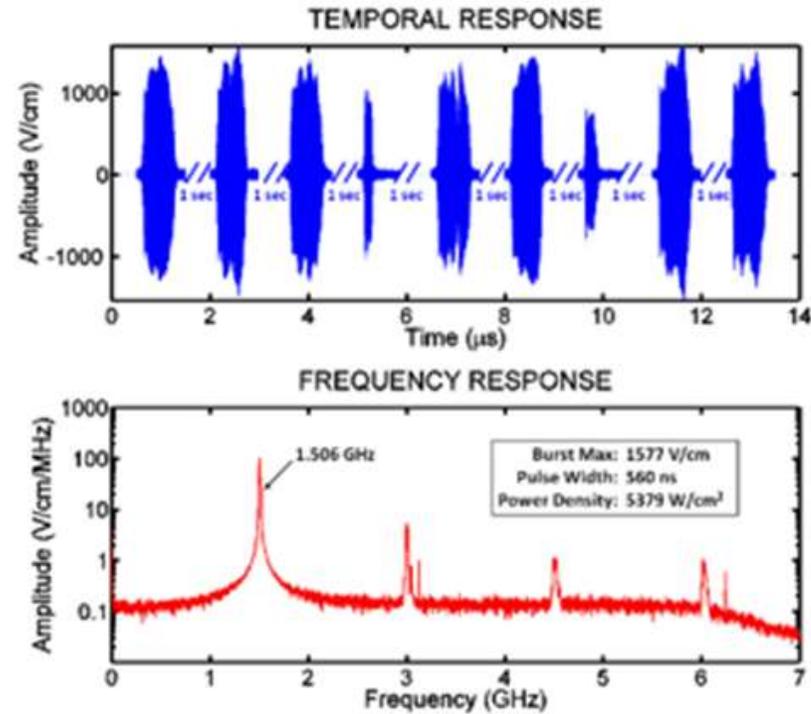


O dispositivo RMG é feito “efetivamente” de comprimento infinito pela incorporação de refletores nos seus terminais.

Jay H. Barton, R. C. Rumpf, R. W. Smith, "All-Dielectric Frequency Selective Surfaces with Few Periods," PIERS B, Vol. 41, pp. 269-283, 2012.



SSF em micro-ondas de alta potência



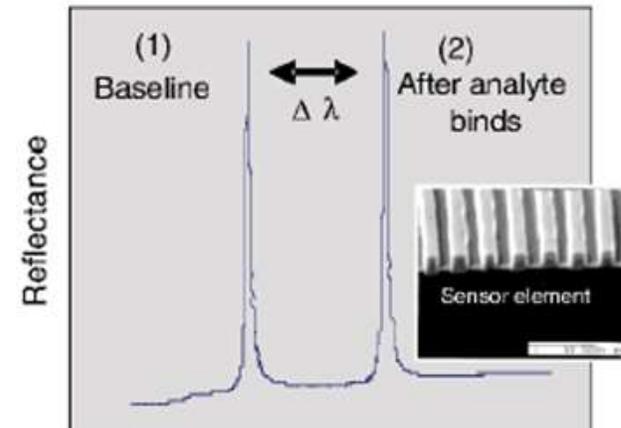
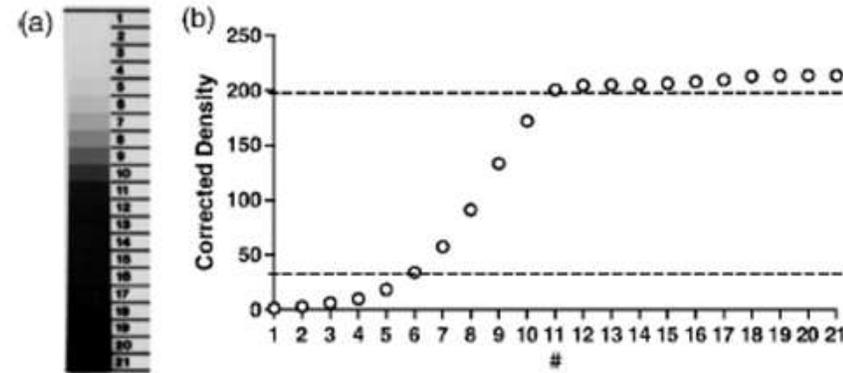
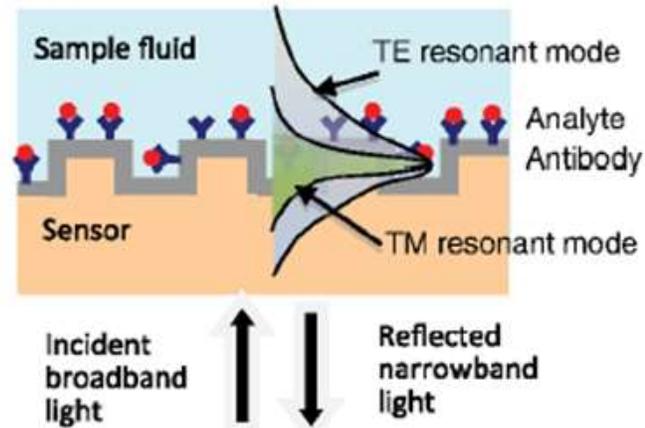
J. H. Barton, C. R. Garcia, E. A. Berry, R. G. May, D. T. Gray, R. C. Rumpf, "All-Dielectric Frequency Selective Surface for High Power Microwaves," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014.



RMG como biosensores

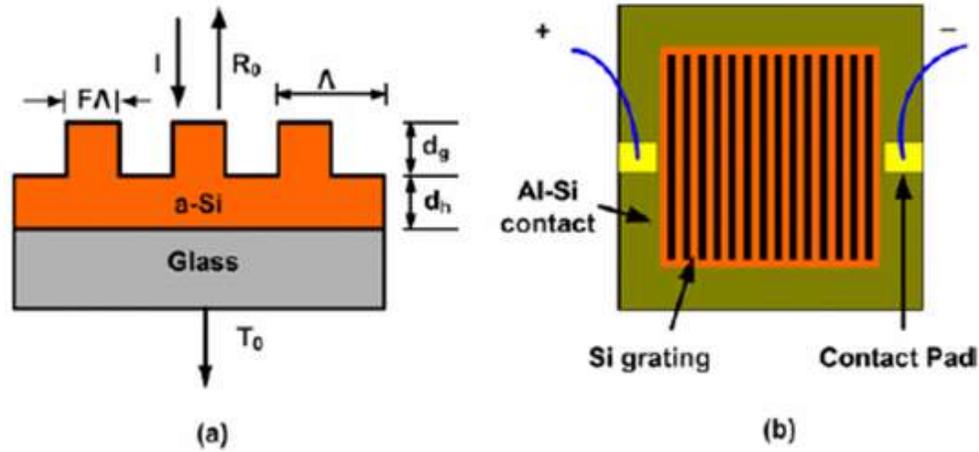
A sensibilidade extrema dos RMGs torna-os idealmente adequados para detectar pequenas variações em dimensões e índices de refração

Eles estão se tornando mais populares em biosensores por esta razão

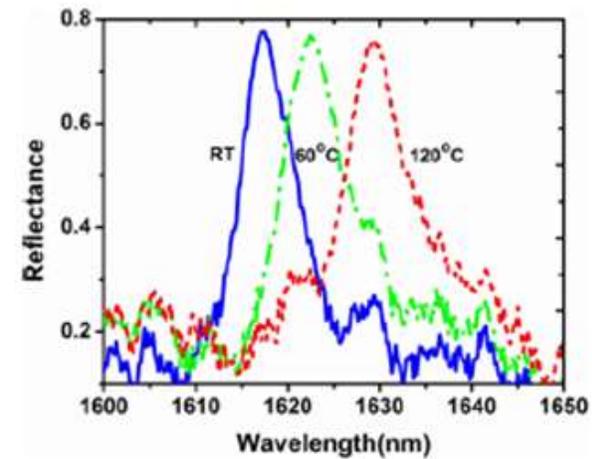


Simon Kaja, Jill D. Hilgenberg, Julie L. Clark, Anna A. Shah, Debra Wawro, Shelby Zimmerman, Robert Magnusson, and Peter Koulen, Detection of novel biomarkers for ovarian cancer with an optical nanotechnology detection system enabling label-free diagnostics, *Journal of Biomedical Optics*, vol. 17, no. 8, pp. 081412-1-081412-8, August 2012.

Filtros óticos sintonizáveis



A alta sensibilidade dos dispositivos RMG é explorada para fazer um filtro sintonizável



Mohammad J. Uddin and Robert Magnusson, Guided-Mode Resonant Thermo-Optic Tunable Filters, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 25, no. 15, pp. 1412-1415, August 1, 2013.

Materiais em engenharia

Classificação



Tamanho x Frequência

Cristais fotônicos

$$a \sim \lambda/2$$

Metamateriais ressonantes

$$a \sim \lambda/10$$

Metamateriais não-ressonantes

$$a \ll \lambda/4$$

Misturas

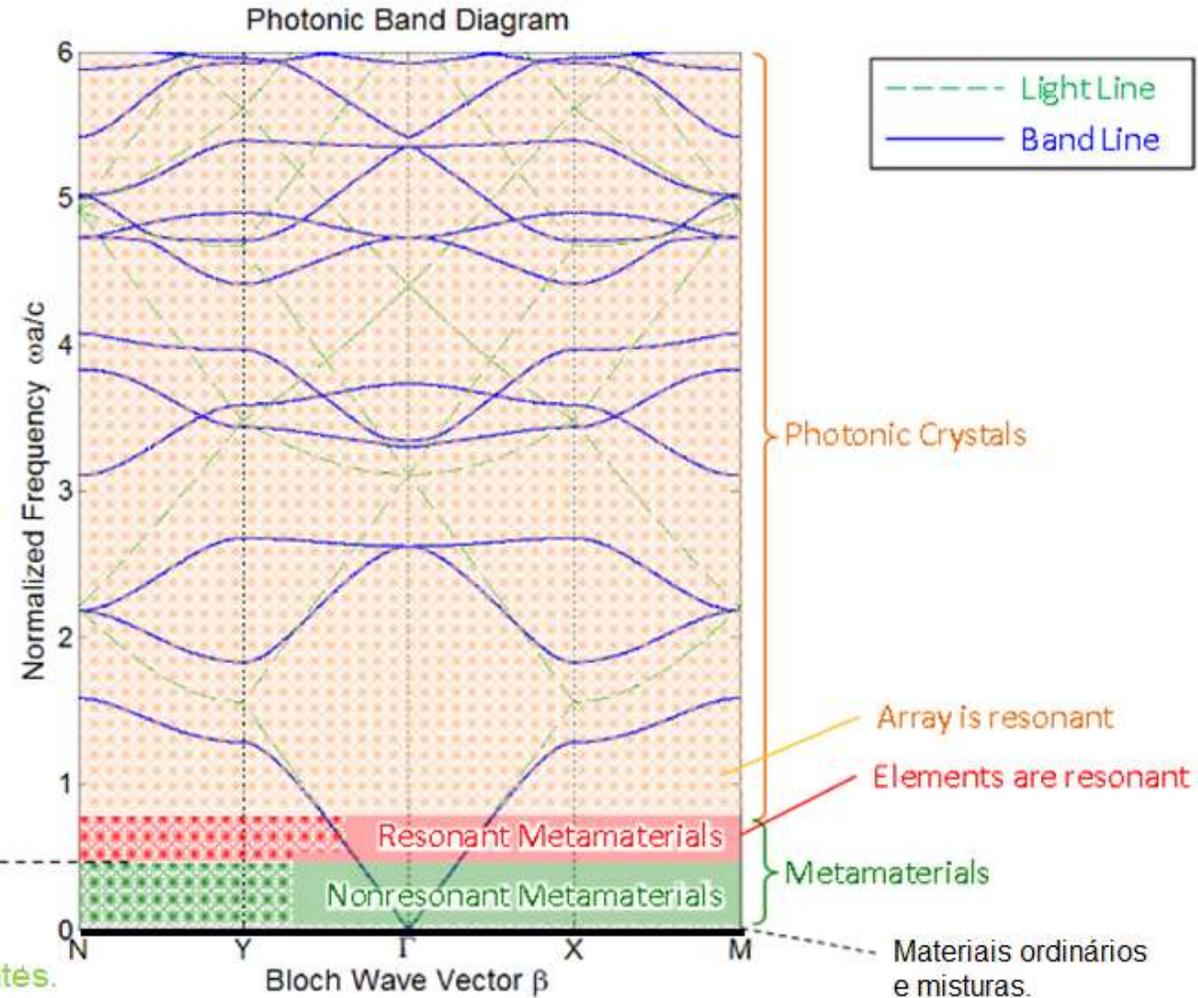
$$a \ll \lambda/20$$

Materiais ordinários

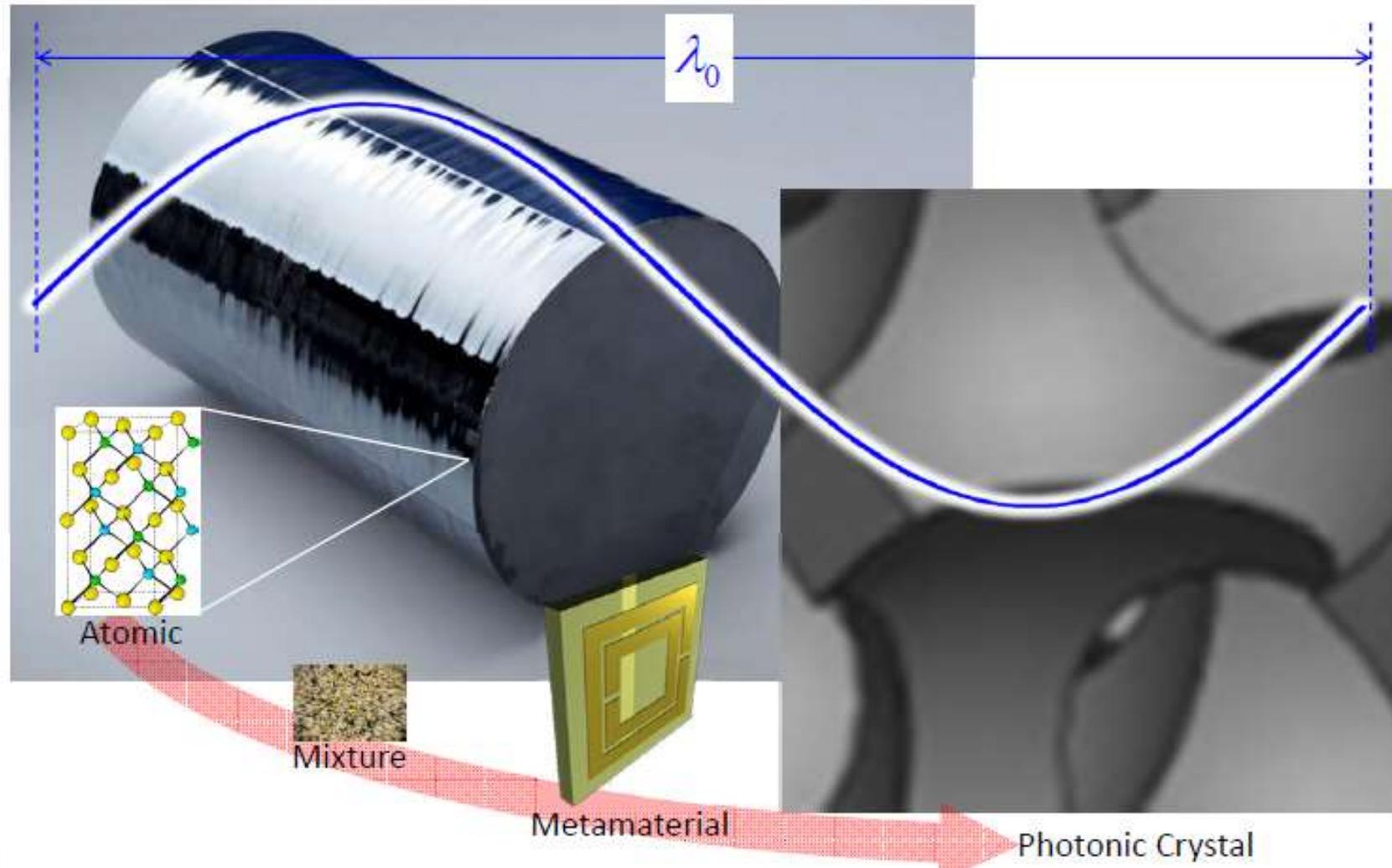
$$a \sim \text{escala atômica}$$

Novas propriedades aparecem da ressonância e interferência.

Propriedade efetivas aparecem das médias dos materiais constituintes.



Visualizando a comparação de tamanhos



Tipos de materiais eletromagnéticos

- Condutores
- Dielétricos
- Magnéticos
- Diamagnéticos
- Paramagnéticos
- Ferromagnéticos
- Antiferromagnéticos
- Absorvedores
- Anisotrópicos
- **Quirais**
- **Girotrópicos**
- **Bi-isotrópico e bi-anisotrópico**

Condutores

- **Supercondutores**
 - Condutividade perfeita
 - Requer esfriamento criogênico
- **Grafeno**
- **Prata**
 - Melhor condutividade
 - Não oxida em AgO até tamanhos de 3 nm e AgO é condutor
- **Cobre**
 - 95% da condutividade da Prata
 - Robusto à oxidação mas CuO é isolante
- **Ouro**
 - 94% da condutividade da Prata
 - Robusto à oxidação
- **Alumínio**
 - Barato mas oxida muito facilmente. Al_2O_3 é cerâmico e isolante
 - Como o Titânio, pós com partículas menores que 20 μm são explosivas
- **Mercúrio**
 - Boa condutividade
 - Espelhos de cristal líquido

Dielétricos

- Teflon
 - Padrão de ouro para os dielétricos ($\epsilon_r = 2,1$)
- FR4
 - Material comum em placas de circuito impresso (PCB)
- Água
 - Condutividade semelhante à da madeira ($\epsilon_r = 81$, em radiofrequência)
- Dióxido de Titânio (TiO_2)
 - Excelente estabilidade térmica ($\epsilon_r = 100$)
- Titanato de Estrôncio ($SrTiO_3$)
 - Forte dependência com a temperatura ($\epsilon_r > 300$)

Magnéticos e absorvedores

- Magnéticos
 - Diamagnéticos (terra)
 - Paramagnéticos
 - Ferromagnéticos (Fe, Ni, Co, magnetita)
 - Antiferromagnéticos (hematita, Cr, FeMn, NiO)
- Absorvedores
 - Água salgada
 - Grafite
 - Materiais negros

Anisotrópicos

- Geralmente muito fracos em rádio frequência
- Mais comuns em frequências óticas
- Uniaxiais
- Biaxiais

DUAS CLASSES DE MATERIAIS ANISOTRÓPICOS

1. Meio Anisotrópico Ordinário

Tensores simétricos

Modos naturais linearmente polarizados

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} \quad \text{e} \quad \mu_{ij} = \mu_{ji}$$

2. Meio Girotrópico

Tensores assimétricos

Modos naturais circularmente polarizados

$$\varepsilon_{ij} = -\varepsilon_{ji} \quad \text{ou} \quad \mu_{ij} = -\mu_{ji}$$

Materials quirais, girotrópicos, bi-isotrópicos e bi-anisotrópicos

- Materiais quirais possuem autoestados que são feixes circularmente polarizados
- Materiais girotrópicos possuem propriedades constitutivas que são afetadas pela atuação de um campo magnético quase-estático (ferrite)
- Em materiais bi-isotrópicos ou bi-anisotrópicos o par de vetores intensidade e densidade de campo eletromagnético não são paralelos

$$\begin{cases} \vec{D} = \epsilon \vec{E} - j\kappa \vec{H} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} + j\kappa \vec{E} \end{cases} \rightarrow \text{Quiral}$$

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_a & -j\epsilon_b & 0 \\ j\epsilon_b & \epsilon_a & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_c \end{bmatrix} \quad \text{gyroelectric}$$

$$[\mu] = \begin{bmatrix} \mu_a & -j\mu_b & 0 \\ j\mu_b & \mu_a & 0 \\ 0 & 0 & \mu_c \end{bmatrix} \quad \text{gyromagnetic}$$

Bi-Isotropic

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon \vec{E} + \xi \vec{H} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} + \zeta \vec{E} \end{aligned}$$

Bi-Anisotropic

$$\begin{aligned} \vec{D} &= [\epsilon] \vec{E} + [\xi] \vec{H} \\ \vec{B} &= [\mu] \vec{H} + [\zeta] \vec{E} \end{aligned}$$

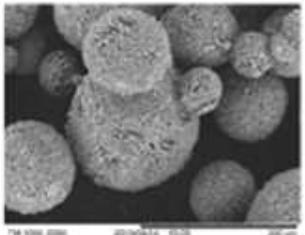
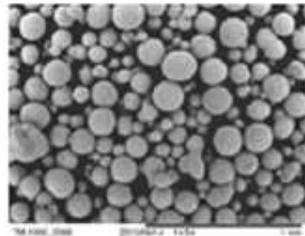
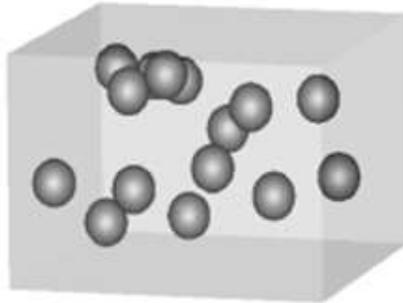
Classification of Bi-Isotropic Media

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} + (\chi - j\kappa) \vec{H} \quad \vec{B} = \mu \vec{H} + (\chi + j\kappa) \vec{E}$$

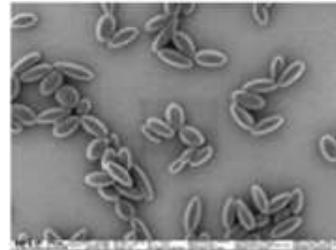
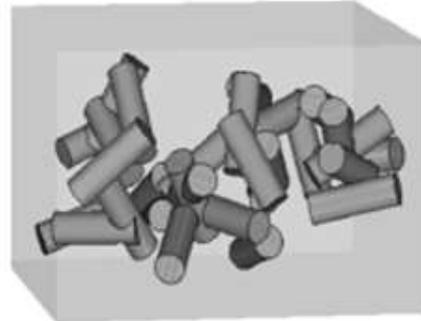
| | Nonchiral ($\kappa = 0$) | Chiral ($\kappa \neq 0$) |
|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Reciprocal ($\chi = 0$) | Simple isotropic medium | Pasteur medium |
| Nonreciprocal ($\chi \neq 0$) | Tellegen medium | General bi-isotropic medium |

Misturas

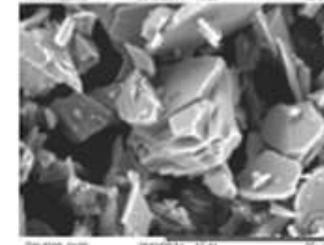
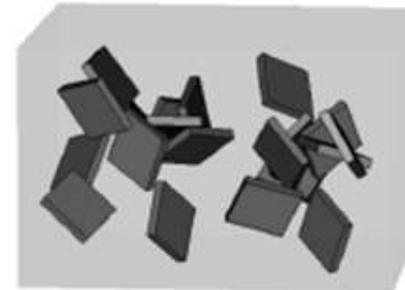
ESFERAS



CILÍNDROS



FLOCOS



Aumento típico de ϵ_{eff}



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