



# Introdução aos metamateriais eletromagnéticos

*Prof. Dr. Gláucio Lima Siqueira*

# 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/>

**PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA**

# 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

# Tópico 12

## Ondas Lentas

- Introdução
- Ondas lentas
- Estruturas ressonantes para ondas lentas
- Materiais para ondas lentas

# Introdução

**PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA**

# Velocidade de fase, de grupo e do sinal

## Velocidade de Fase

Descreve a velocidade e direção da fase de uma onda

$$\vec{v}_p = \frac{\omega}{|\vec{k}|} \hat{s} \quad n_p = \frac{c_0}{v_p}$$

## Velocidade de Grupo

Descreve a velocidade e direção do envelope de um pulso

$$\vec{v}_g = \nabla_{\vec{k}} \omega(\vec{k}) \quad n_g = \frac{c_0}{v_g}$$

$$\vec{v}_g = \vec{v}_p \quad \text{sem dispersão}$$

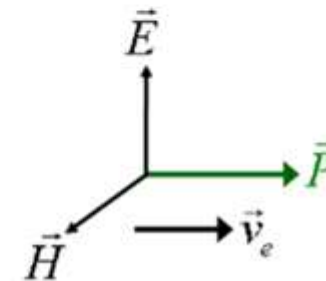
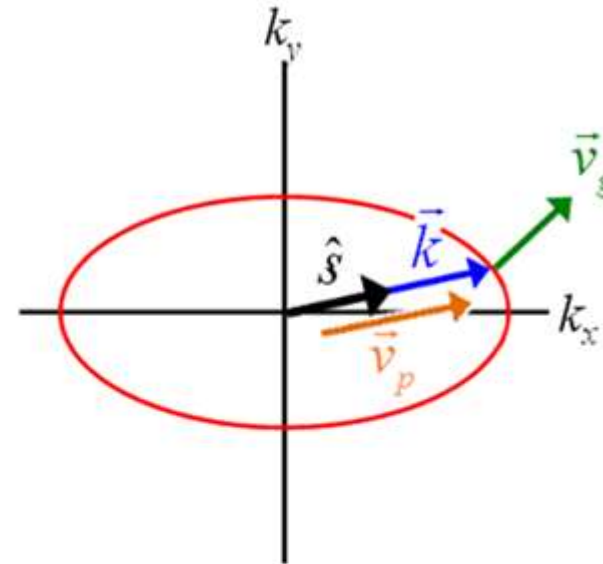
## Velocidade da Energia

Descreve a velocidade e direção da energia

$$\vec{v}_e = \frac{\vec{P}}{U} \quad n_e = \frac{c_0}{v_e}$$

$$\vec{v}_e = \vec{v}_g$$

materiais lineares



# Índices

- Podemos demonstrar que é a dispersão que causa a diferença entre as velocidades (ou os índices de refração) de grupo e de fase

$$v_g = v_p - \frac{\omega}{n} \frac{dn}{dk} = v_p \left( 1 - \frac{k}{n} \frac{dn}{dk} \right)$$

$$n_g = n_p + \omega \frac{dn_p}{d\omega} = n_p - \lambda_0 \frac{dn_p}{d\lambda_0}$$



# Ondas Lentas

PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA

# Velocidade de fase, de grupo e do sinal

- Uma onda lenta é uma onda com velocidade de grupo muito pequena
- Uma onda lenta NÃO é definida em termos de velocidade de fase
- O fenômeno ocorre devido à interação com o meio em que a onda se propaga
- Onda lenta não pode ocorrer no espaço livre porque não existe meio



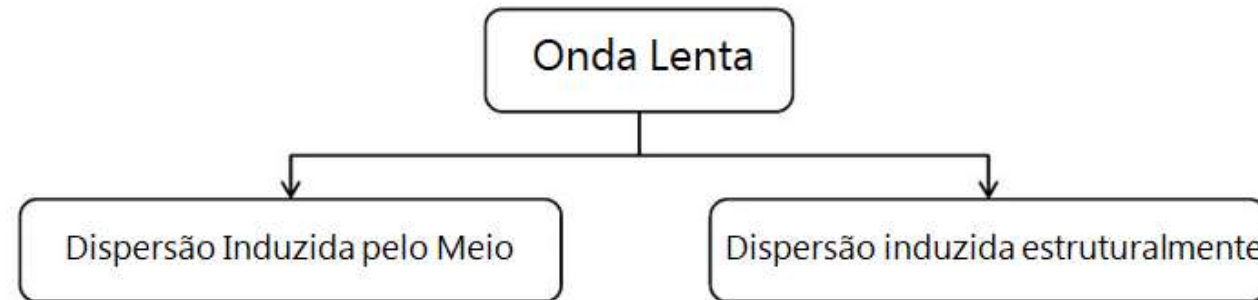
# Como criamos ondas lentas?

Dizemos que a velocidade de grupo é determinada pela dispersão.

$$\vec{v}_g = \vec{v}_p \left[ 1 - \frac{k}{n} \cdot \nabla_k n \right] \quad n_g = n - \omega \frac{dn}{d\omega}$$

Para criar uma onda lenta devemos introduzir dispersão.

Como introduzimos dispersão?



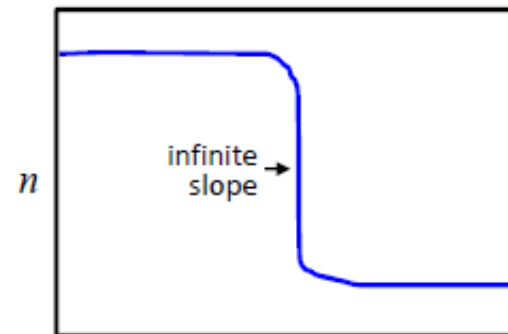
# Como paramos uma onda?

- Inspeccionando a equação do índice de refração de grupo,

$$n_g = n - \omega \frac{dn}{d\omega}$$

- vemos que podemos parar uma onda se  $n_g \rightarrow \infty$ . A condição para isto é:

$$\frac{1}{dn/d\omega} = 0$$



# Esquemas para ondas lentas

- Dispersão do meio
  - Condensado de Bose-Einstein
  - Transparência induzida eletromagneticamente
  - Oscilação populacional coerente
  - Espalhamento estimulado
- Dispersão estrutural
  - Cristais fotônicos
  - Ressonadores acoplados
  - Guias de onda

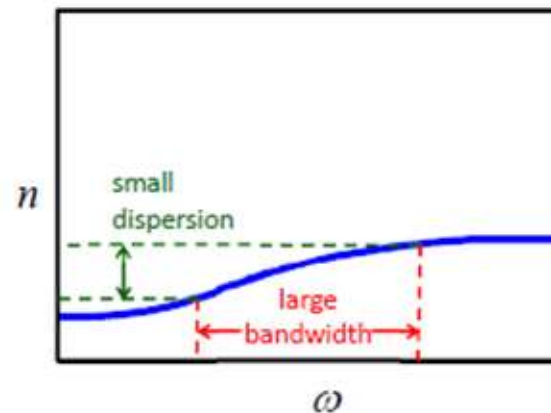
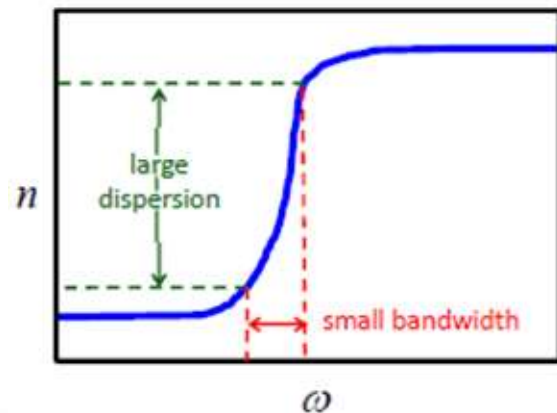
Abordagem geralmente preferida em temperaturas ambientes devido à forte dependência com a temperatura sobre os mecanismos baseados no material e à implementação mais fácil.

# Aplicações

- Linhas de retardo
- Redução de ruído
- Chaveamento e armazenamento ótico
- Processamento de sinal no domínio do tempo avançado
- Ressincronização de relógio
- Controle da informação numa rede
- Compressão de pulso
- Interferômetros mais sensíveis
- Miniaturização
- Aumento de efeitos lineares e não lineares
- Aceleração de partículas

# Métricas importantes para ondas lentas

- Existem duas métricas importantes a se considerar em estruturas de ondas lentas:
  1. **Largura de banda em frequência** – Gostaríamos que essa métrica fosse grande de modo a lidar com mais tipos de sinais
  2. **Dispersão (Retardo)** - Gostaríamos que essa métrica fosse grande de modo a produzir ondas lentas
- Existe um limite fundamental do quão grande essas métricas podem ser ao mesmo tempo. Aumentando uma virtualmente sempre decresce outra



Quanto mais extremos valores de  $n$  conseguirmos, maiores largura de banda/dispersão podemos realizar

# Produto banda-retardo

O produto banda-retardo (DBP) é usado para quantificar o compromisso entre banda e retardo.

$$\text{DBP} = (\text{delay}) \cdot (\text{bandwidth}) = \Delta t \cdot \Delta f = \frac{L \Delta n}{\lambda_0}$$

$L \equiv$  comprimento do dispositivo

$\Delta n \equiv$  variação de  $n$  na banda

$\Delta t \equiv$  retardo através do comprimento  $L$

$\lambda_0 \equiv$  comprimento de onda de operação

$\Delta f \equiv$  largura de banda de operação

Geralmente o DBP normalizado é útil quando comparando dispositivos de comprimentos diferentes ou operando em outro comprimento de onda.

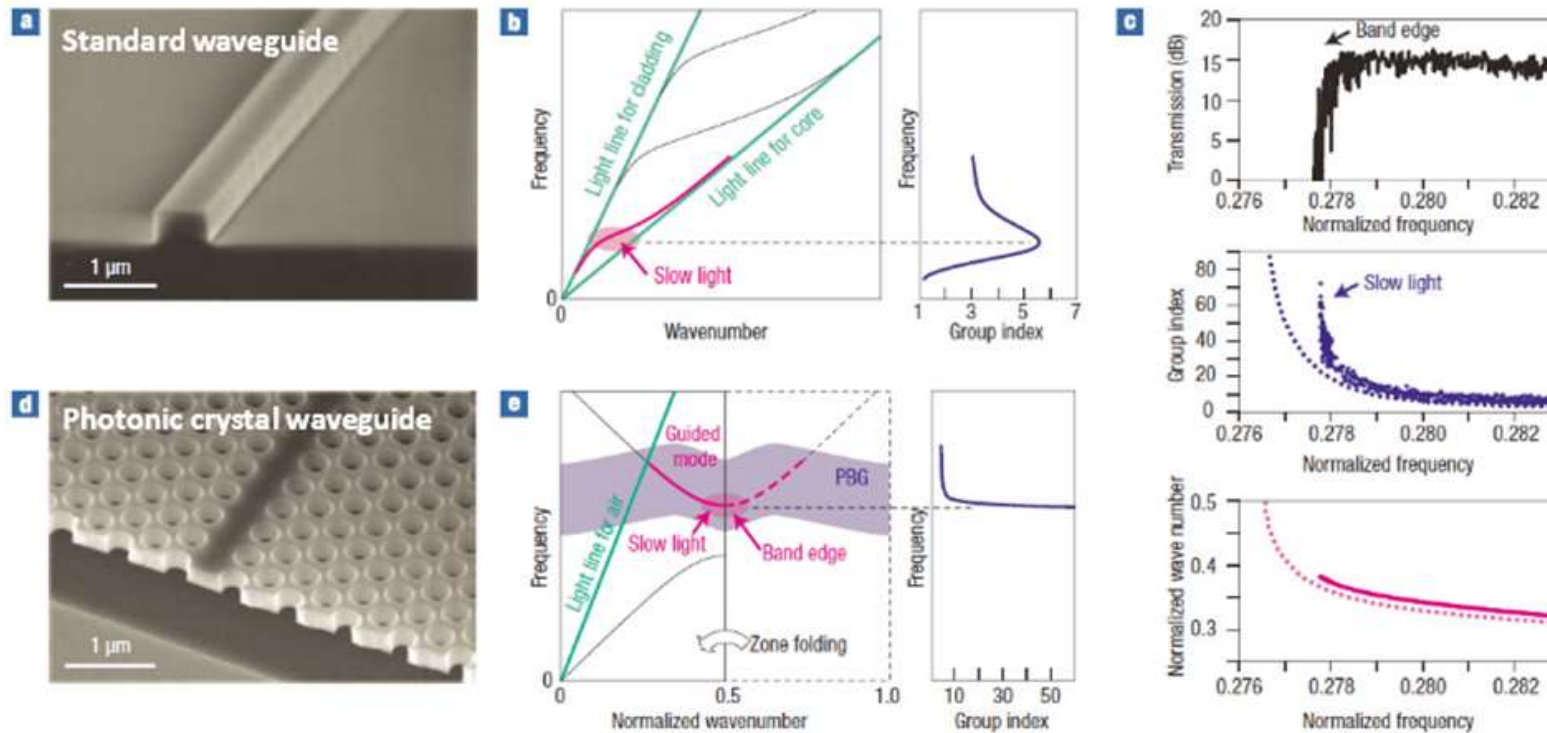
$$\widetilde{\text{DBP}} = n_g \left( \frac{\Delta f}{f} \right) \cong \Delta n$$



# **Estruturas Ressonantes para Ondas Lentas**

**PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA**

# Guia de onda de cristal fotônico

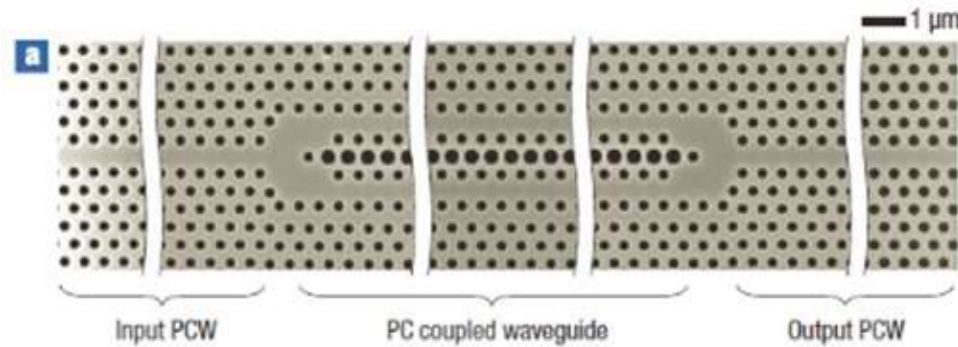


(a) Shows perhaps the first slow light device. Slow light occurs most strongly near the cutoff of the waveguide where its dispersion is highest. (d) Group index is greatly enhanced using a photonic crystal waveguide.

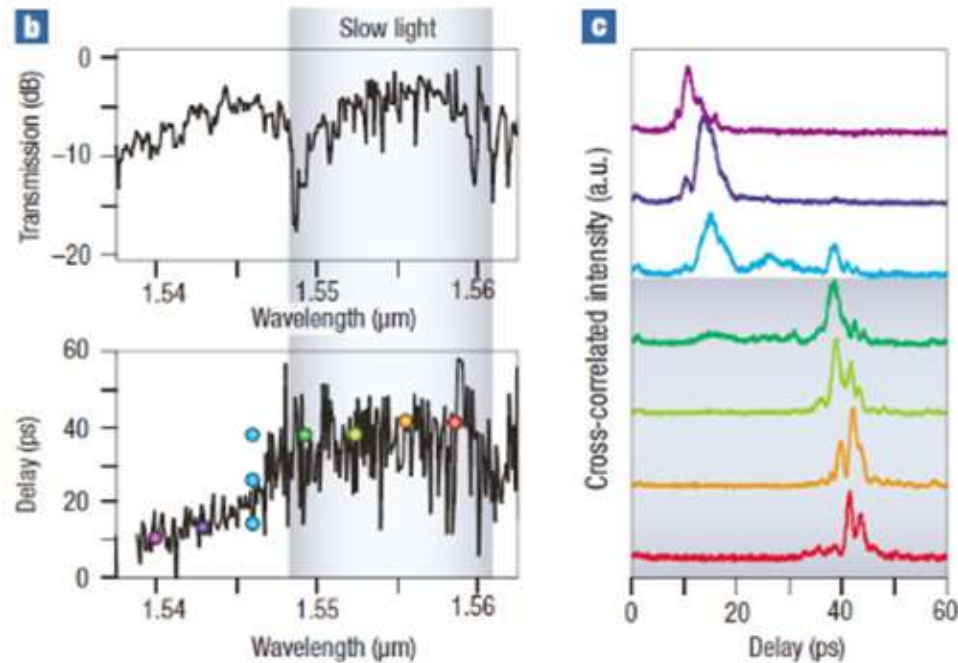
T. Baba, "Slow light in photonic crystal" Nature Photonics 2, 465-473 (2008).

PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGÍLIO DE ALMEIDA

# Guias de onda de cristal fotônico acoplados



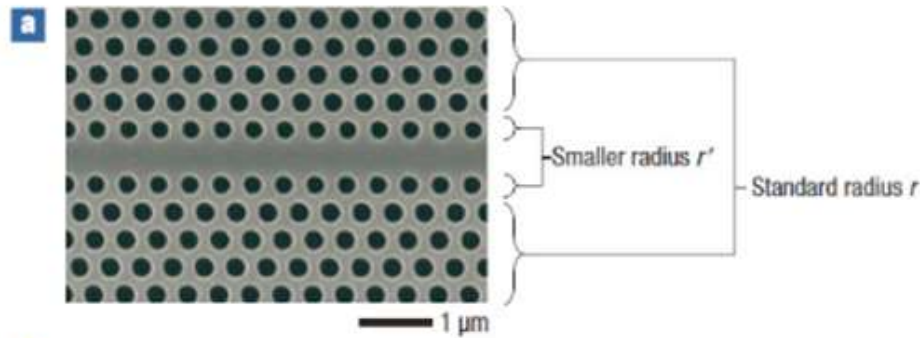
- Compensação de dispersão mais sofisticada
- $n_g \cong 40 - 60$



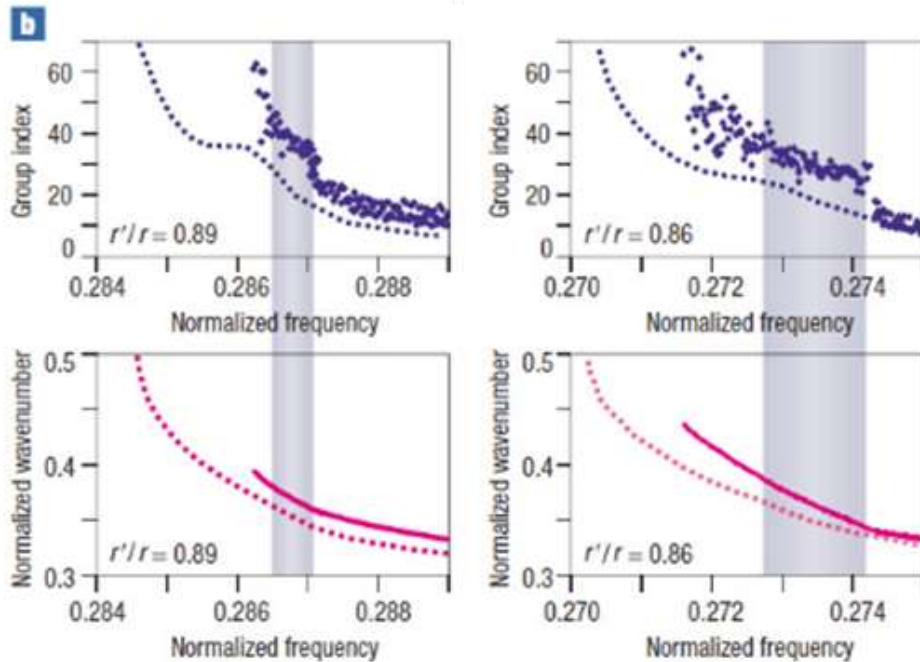
T. Baba, "Slow light in photonic crystal," Nature Photonics 2, 465-473 (2008).

**PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA**

# Ondas lentas com dispersão zero



- Tapered hole size to flatten the dispersion.
- $n_g \cong 37 - 40$



T. Baba, "Slow light in photonic crystals," Nature Photonics 2, 465-473 (2008).

PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA

# Guia de onda de ar envolvido por metamaterial anisotrópico

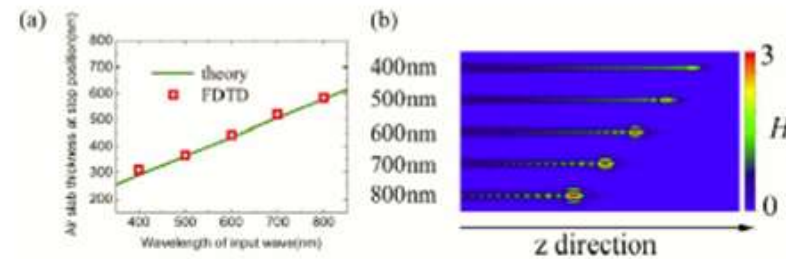
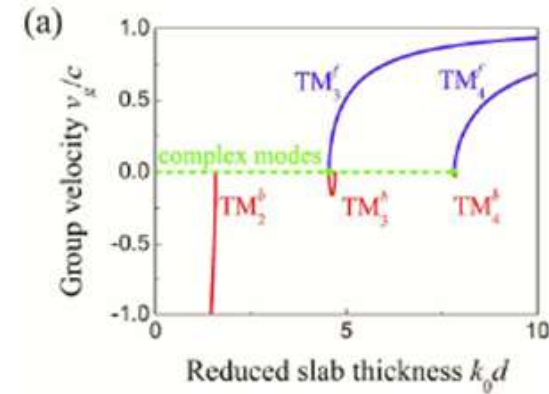
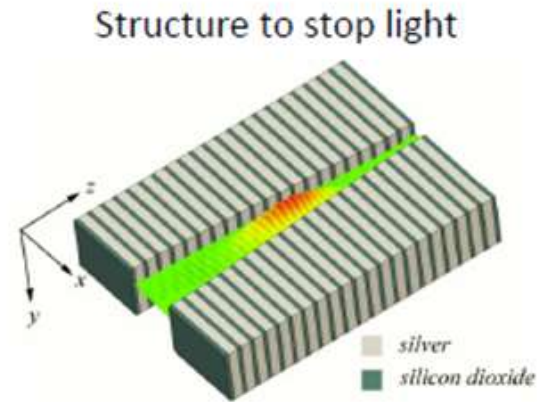
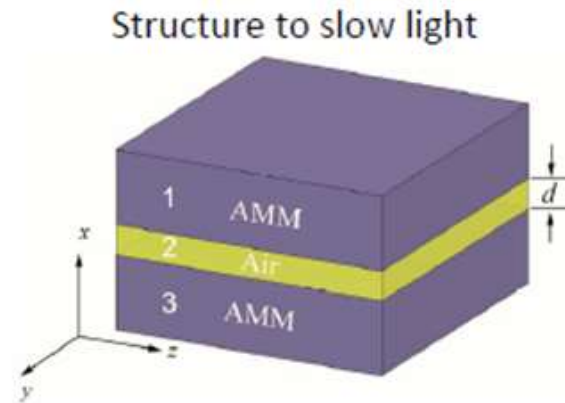


Fig. 5. (a) The relationship between the air slab thicknesses of the stop position and the excitation frequencies (material dispersion is not considered here). (b) Spatial field distributions in the tapered waveguide for light launched from the wider port, with the corresponding wavelengths marked on the left side.

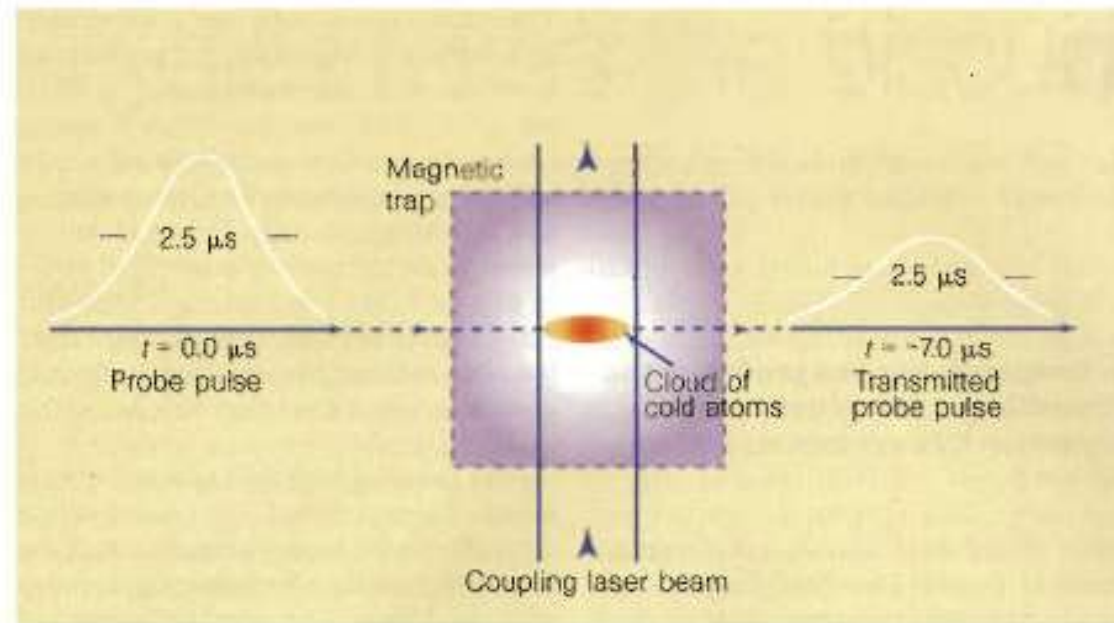
T. Jiang, J. Zhao, Y. Feng, "Stopping light by an air waveguide with anisotropic metamaterial cladding," *Optics Express* 17(1), 102529 (2008).

# Materials para Ondas Lentas

PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA

# Condensados de Bose-Einstein

- Energia térmica é oscilação mecânica de átomos. Fótons podem transmitir momentum quando absorvido pelos átomos. O átomo recua dentro de nano segundos com uma velocidade de alguns mm por segundo. Este conceito pode ser usado para resfriar átomos a temperaturas bem próximas do zero absoluto ( $< 0,4$  K)

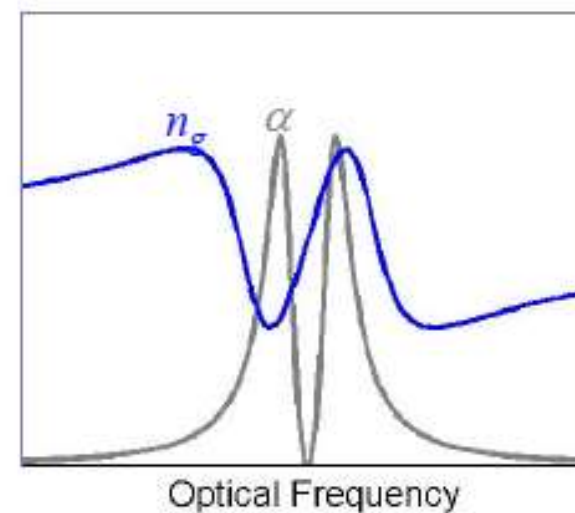
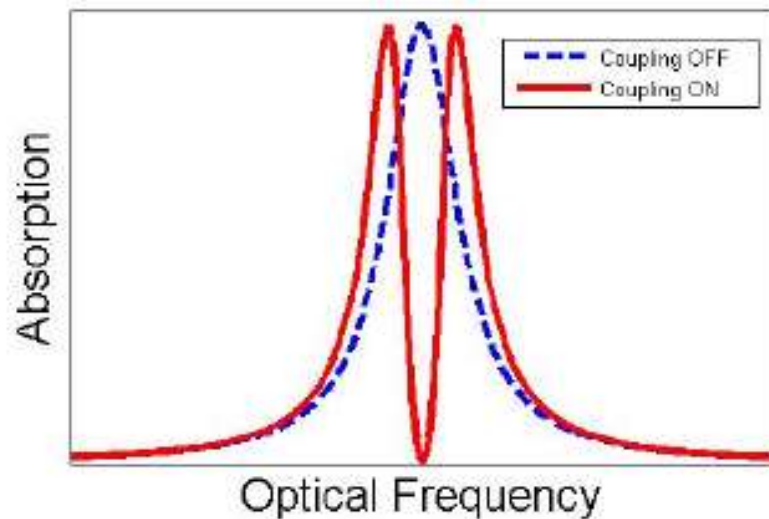


J. Marangos, "Slow light in cool atoms." Nature News, 6 (1999)

**PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA**

# Transparência eletromagneticamente induzida

- Transparência eletromagneticamente induzida (EIT) ocorre em um material onde uma não linearidade produz uma estreita banda de transparência na banda de absorção. Dispersão extrema em banda estreita causa ondas lentas



Essa técnica envolve uma delicada interferência quântica. Ela só foi demonstrada em temperaturas criogênicas para prever colisões e o fenômeno de defasamento.

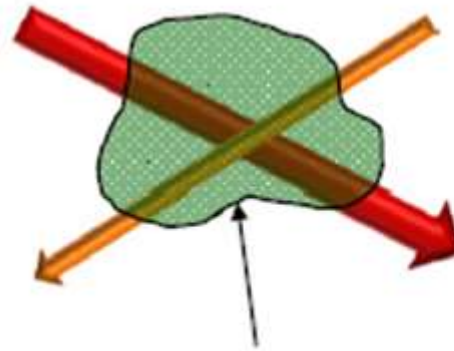
**PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA**



# Oscilações de população coerentes

- Quando os feixes de um sinal e de uma bomba de comprimentos de onda ligeiramente diferentes interagem em absorvedores saturáveis, o estado fundamental (ground state) do material oscila coerentemente na frequência de batimento dos dois feixes. Ao contrário da EIT, isto é altamente insensível a defasamento. A oscilação produz forte dispersão que leva à luz lenta

Bomba de feixe potente

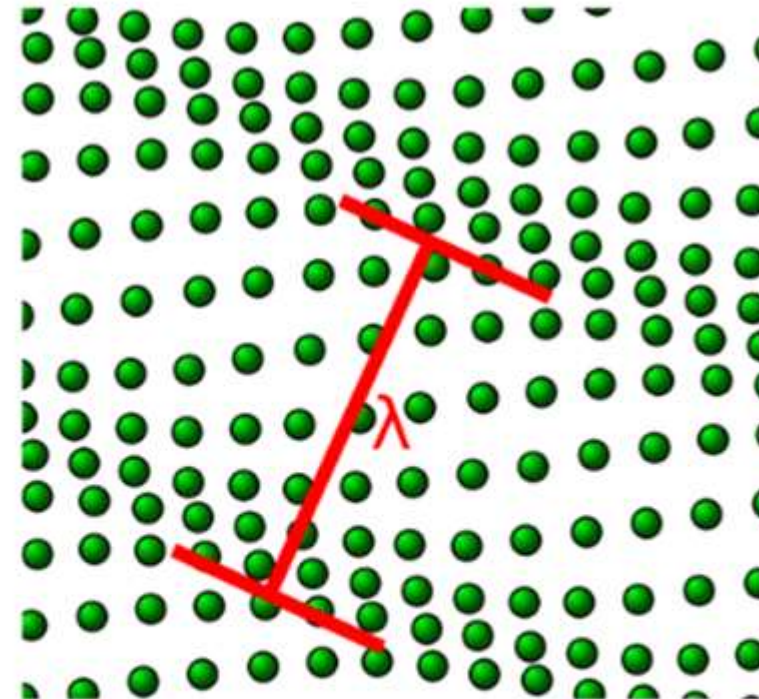


Feixe de sinal

absorvedor saturado

# Luz lenta por espalhamento estimulado

**Espalhamento de Brillouin** - A luz irá espalhar em um material quando sua estrutura cristalina estiver vibrando. Isto faz variar o índice de refração e induz uma rede de difração. Como a estrutura vibrando está em movimento, existe um deslocamento Doppler na onda espalhada o que nos dá a impressão de uma mudança na sua frequência. Isto é chamado de deslocamento de Brillouin.

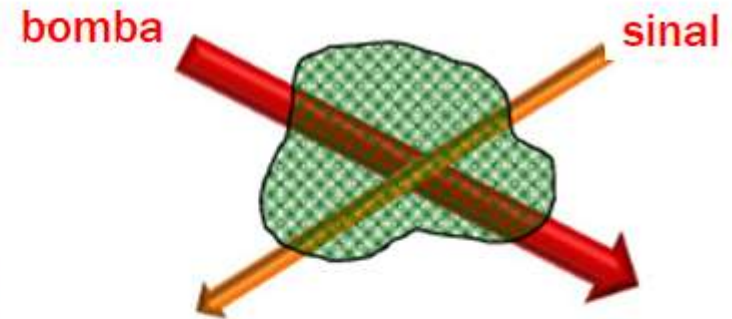


**Espalhamento Raman** - O espalhamento Raman é semelhante ao espalhamento de Brillouin, mas as oscilações são muito mais rápidas, pois, resultam das oscilações dos átomos e das moléculas individualmente.

**PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA**

# Luz lenta por espalhamento estimulado

Podemos estimular o processo de espalhamento produzindo a interferência entre dois feixes com frequências ligeiramente diferentes. Quando a frequência de batimento casa com a frequência de oscilação do material, o espalhamento é estimulado.



A energia se transfere da bomba para o feixe de sinal produzindo ganho.

O processo de amplificação é também acompanhado por uma variação espectral do índice de refração que produz luz lenta.

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

**PROPRIEDADE DE GLÁUCIO LIMA SIQUEIRA E JORGE VIRGILIO DE ALMEIDA**