

Lasers, Fibras Ópticas Sistemas Amplificados

Efeitos não-lineares

Felipe Rudge Barbosa
Rudge@dsif.fee.unicamp.br

1

Lasers, Fibras Ópticas Sistemas Amplificados

=> Efeitos Não-lineares

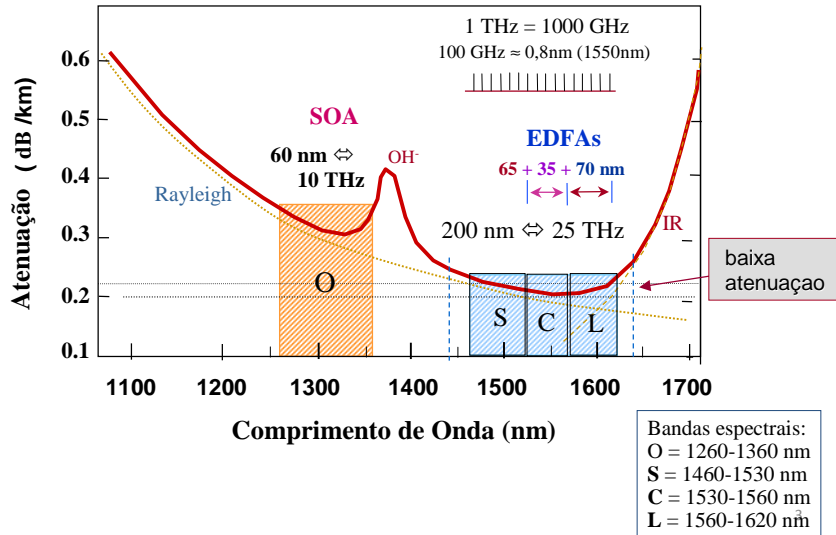
- quando há forte confinamento do cpo. propagante (*luz na fibra*) -- com baixa dispersão cromática e baixa atenuação, significa que os fons estarão em fase e terão longos *comprimentos de interação*;
 - isto via-de-regra dá condições a aparecimento de *efeitos não-lineares*;
- ocorrem quando os campos elétricos de propagação tem intensidade comparável aos campos elétricos naturais do material (10^9 V/cm²);
- além disso, pode-se jogar com *dispersão normal e anômala*, a fim de comprimir e dilatar pulsos óticos;

Atenuação e Dispersão (revisited) >>>>

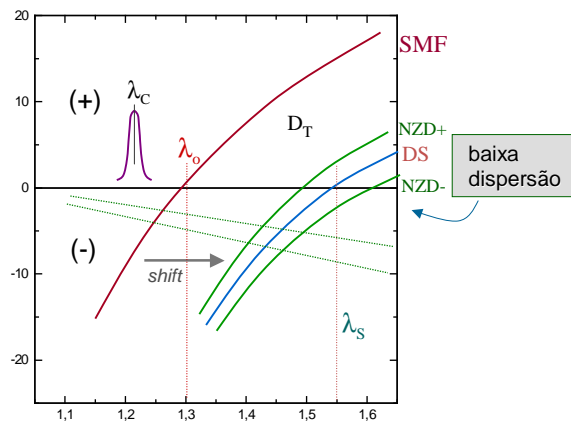
2

Atenuação em Fibras Ópticas

Fibra Monomodo Padrão



Dispersão em Fibras Ópticas



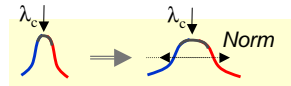
- ⇒ fibras de dispersão deslocada são obtidas aumentando D_{GO} : DS, NVD+/-
- ⇒ regime de dispersão normal ou anômala vai depender de qual λ_0 e qual fibra em que está se propagando! -- (adiante) >>

Dispersão em Fibras Ópticas

.rev.

⚙️ Dispersão

- a *dispersão* em *meios materiais* sempre atrasa (e alarga no tempo) a propagação de sinais (lineares e não-lineares);
 - ❖ isto é percebido em sinais pulsados, mas ocorre tb. em sinais contínuos;
- as *componentes cromáticas* do pulso de luz viajam a diferentes velocidades, pois o índice de refração n efetivo varia com λ ;
- a *dispersão material* pode ser "zero" (λ_0); e *muda de sinal* pra lambdas acima e abaixo de λ_0 ;
- ❖ dispersão normal ($\lambda_c < \lambda_0$): λ_c comprim. de onda central do pulso;
 - ⇒ trecho espectro abaixo da *dispersão cromática zero* (daquela fibra específica);
 - ⇒ compon. λ_+ (+longas): enxergam n_I menor $\Rightarrow v_g$ mais rápida \rightarrow vai pra *frente*; (acelera)
 - ⇒ compon. λ_- (+curtas): enxergam n_I maior $\Rightarrow v_g$ mais lenta \rightarrow vai pra *trás*; (freia)



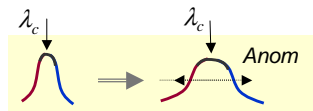
5

Dispersão em Fibras Ópticas

.rev.

⚙️ Dispersão (cont.)

- ❖ anômala ($\lambda_c > \lambda_0$): λ_c é o comprim. de onda central do pulso;
 - inverte-se situação... devido a inversão do sinal da derivada; ou seja,
 - ⇒ compon. λ_- (+curtas): enxergam n_I menor $\Rightarrow v_g$ mais rápida \rightarrow vai pra *frente*; (acelera)
 - ⇒ compon. λ_+ (+longas): enxergam n_I maior $\Rightarrow v_g$ mais lenta \rightarrow vai pra *trás*;



⇒ Desse modo, pode-se controlar a dispersão em fibras:
 = para uma fibra SMF padrão um sinal em 1550nm está na região de dispersão anômala; se injetamos esse mesmo sinal numa fibra NZD-, o sinal verá dispersão normal, e o *spreading* do sinal será compensado pela inversão espectral! (logicamente ele se comprime até largura inicial)

6

- **Efeitos não-lineares**

- cpo. elétrico, $E_{x,y} = E_{ox,oy} e^{i(\omega t + kz + \phi)}$; ω energia, k direção, ϕ fase
- polarizabilidade do meio: $P = \chi E + (\chi^{(2)} E^2) + \chi^{(3)} E^3$
 - ❖ no caso do vidro, material amorfo/isotropico, $\chi^{(2)}$ desaparece por simetria; e a polarizabilidade de 3a. ordem $\chi^{(3)}$ é o principal responsável pelos efeitos não-lineares; em casos especiais pode aparecer tb. a de 5a. Ordem;
- índice refração não-linear: $n_F = n(\lambda) + n_2 |E|^2$;
- *Polarizabilidade e índice n̄-linear não são a mesma coisa !!*
- ↪ Mas ambos causam alargamento do pulso e/ou geram frequências indesejadas no sinal propagante;
- ➔ (caso especial: sólitons= mantém a largura temporal por enormes distancias)

cont. >>>>

7

- **Efeitos não-lineares -- três grandes classes**

- Efeitos dispersivos (ligados ao $\chi^{(3)}$) espalhamento não-linear
- Efeitos absortivos (ligados ao índice n̄-linear n_2)
- Efeitos paramétricos (ligados ao $\chi^{(3)}$, e n_2) espalham. não-linear

8

Sistemas Amplificados

- Efeitos não-lineares
 - Efeitos dispersivos (ligados ao $\chi^{(3)}$) espalhamento não-linear
 - efeito Raman estimulado (SRS) [fibra, amp-f]
 - efeito Brillouin estimulado (SBS) [fibra, amp-f]
 - Efeitos absortivos (ligados ao índice ã-linear)
 - auto-modulação de fase (SPM) [fibra, amp-f] [laser, SOA]
 - modulação de fase cruzada (XPM) [fibra, amp-f] [SOA]
 - instabilidade modulacional [laser, SOA]
 - modulação de ganho cruzado (XGM) [SOA]
 - transparência auto-induzida: solitons [fibra, amp-f]
 - Efeitos paramétricos (ligados ao $\chi^{(3)}$, e n_2) espalham. não-linear
 - mistura de Quatro Ondas (FWM) [fibra, amp-f] [laser, SOA]
 - Geração de 2 ftons, e sinais multinivel;

9

Sistemas Amplificados

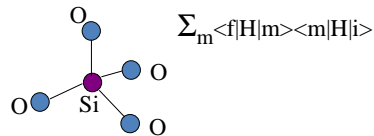
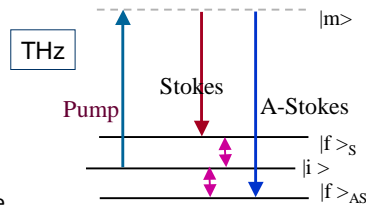
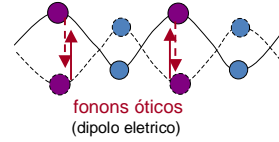
Efeitos não-lineares (cont.)

- Efeitos dispersivos (ocorrem nas fibras)
 - efeito **Raman estimulado** (SRS) e **Brillouin estimulado** (SBS), devidos a espalhamento não-linear (*non-linear scattering*) do campo elétrico pelas vibrações moleculares (phonons) da silica;
 - $P = \chi E + \chi^{(3)} E^3$
 - SRS fonons óticos (dista 90 nm ou ~12 THz); amplificador Raman;
 - SBS fonons acústicos (dista ~11 GHz);
 - mistura de quatro-ondas (FWM): sinais-in, Rm-stokes+pump; sinal-out (amplif.)

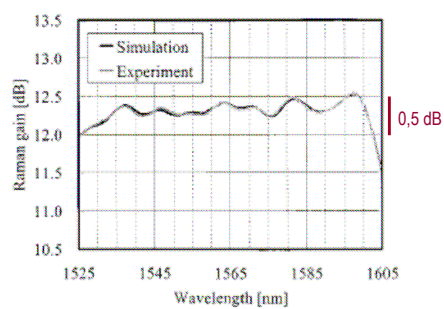
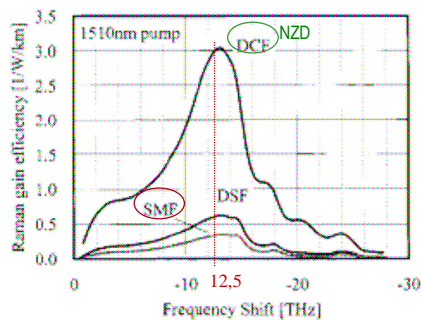
>>>

10

- Efeito Raman Estimulado (SRS)
 - ❖ Efeito Raman envolve transições de 2a. ordem, envolvendo fonons óticos (alta freq.), ditas *não-lineares* pois introduzem *novas frequências* ao sinal propagante;
 - ❖ quando a intensidade de bombeio é muito forte, essas *novas frequências* podem ser usadas como bombeio para o sinal principal (amplificador), ou para novas "fontes" de transmissão.
 - ❖ No amplificador Raman (já visto) usam-se apenas as frequências do lado Stokes (comprim. onda + longo)



Espectro de ganho Raman



Bombeio simples

12,5 THz ~ 90 nm
 $\lambda_s=1560\text{nm} \leftarrow \lambda_p=1470\text{nm}$
 $\lambda_s=1550\text{nm} \leftarrow \lambda_p=1460\text{nm}$

Bombeio Múltiplo
(8 lasers)

Espectro de Raman estimulado -- SRS

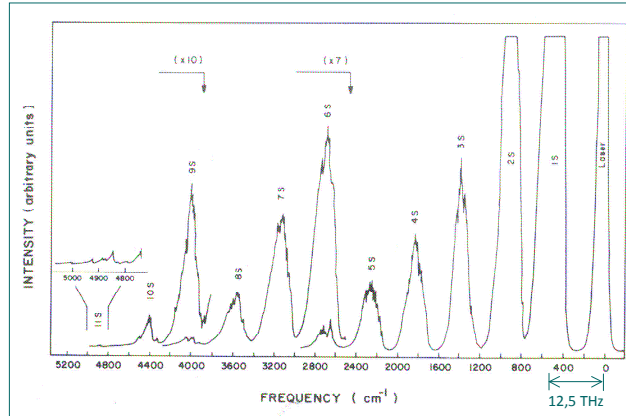


Fig.3 - Multiple Stokes [spectrum](#) showing 11 orders of SRS.

=> cada ordem gera a ordem seguinte: pump gera 1S; 1S gera 2S; e assim até 11S.

Fonte: F.R.Barbosa, APPLIED OPTICS / Vol. 22, No. 23 / 1 December 1983

Conversão potencia/frequencia de Raman estimulado -- SRS

=> cada ordem gera a ordem seguinte, perdendo sua potencia:
pump perde pra 1S;
1S perde pra 2S; e assim até 11S.

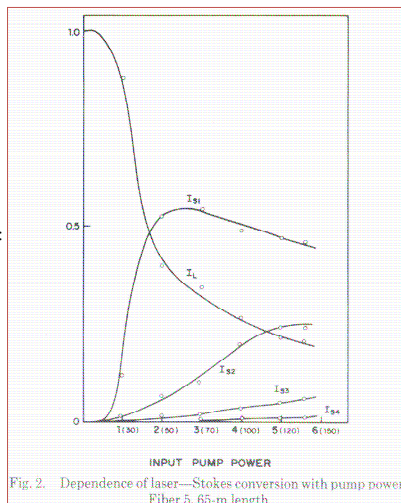
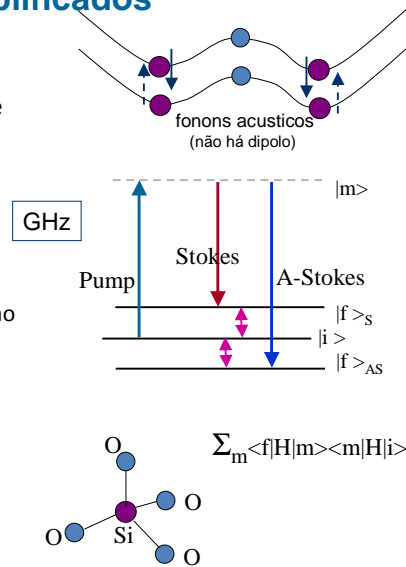


Fig. 2. Dependence of laser—Stokes conversion with pump power. Fiber 5.65-m length.

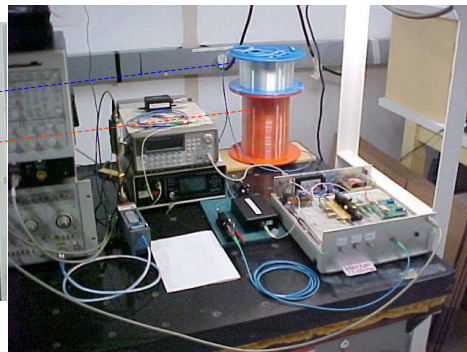
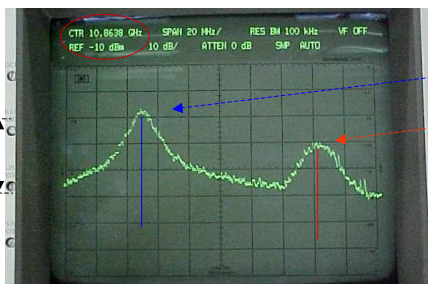
Fonte: F.R.Barbosa, APPLIED OPTICS / Vol. 22, No. 23 / 1 December 1983

➤ Efeito Brillouin Estimulado (SbS)

- ❖ Efeito Brillouin envolve tb. transições de 2a. ordem, mas envolvendo fonons acusticos (bx. Freq.) ditas *não-lineares*, pois introduzem *novas frequencias* no sinal propagante;
- ❖ quando a intensidade de bombeio é muito forte, essas *novas frequencias* aparecem como novos sinais, em relação ao sinal principal de interesse na transmissão. (pode p/ ajudar ou atrapalhar..);
- ❖ usam-se apenas as frequencias do lado Stokes (comprim. onda + longo); o lado A-Stokes SBS é "inexistente" ..



Espectro Brillouin em Fibras



Resultado em frequência
 $f_1 = 10,820 \text{ GHz}$; $f_2 = 10,930 \text{ GHz}$
 (conf. esperado!)

Efeitos não-lineares (cont.)

– Efeitos absorptivos (ocorre na fibra; SOA, laser)

- Modulação e dispersão de fase (SPM e XPM) do campo elétrico devido a refração não-linear,

$$\phi_{NL} = n_2 \cdot k \cdot L \cdot |E|^2, \quad n_2 \text{ índice não-linear, } k=2\pi/\lambda$$

⇒ alarga o pulso e distorce o sinal;

➢ SPM = afeta o próprio canal;

➢ XPM = cada canal afeta outros canais – e é recíproca/te afetado !!

- Modulação de ganho cruzado (XGM):: a potencia de um canal A pode ser usada para modular o ganho em outro canal B; um sinal CW-A pode ser modulado por outro sinal B, em outra frequência ($\lambda_A; \lambda_B$)

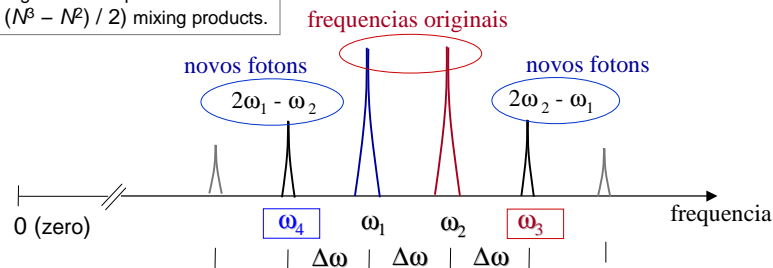
- Instabilidade modulacional: ocorre na modulação direta de lasers em altas taxas (alta frequência); variação instantânea da população das bandas condução e valência; altera energia(freq.), amplitude e fase do sinal !!

Efeitos não-lineares (cont.)

– Efeitos paramétricos (ocorrem em tudo!)

- Mistura de Quatro Ondas (FWM): combinação não-linear de três fons (2+1), através $\chi^{(3)}$ (e/ou n_2), gerando novos fons, (os quartos + e -) em frequências acima e abaixo dos originais.

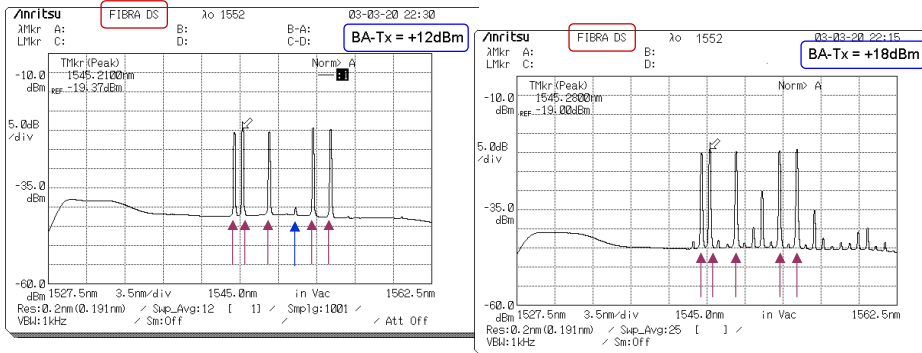
N mixing waves will produce exact $(N^3 - N^2) / 2$ mixing products.



Efeitos não-lineares -- Resultados Experimentais

➤ Efeitos paramétricos

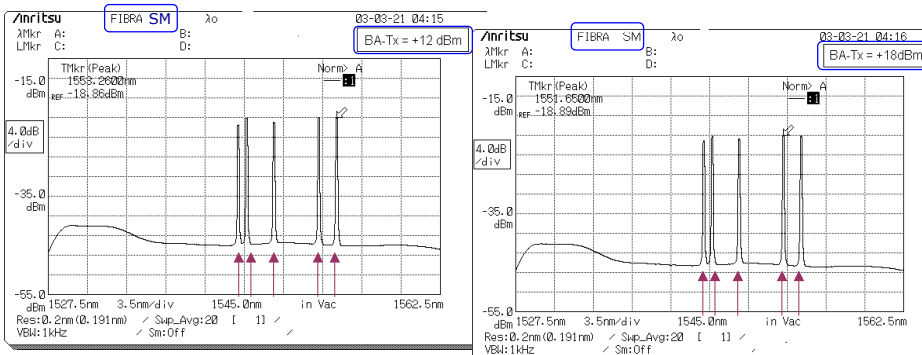
- Mistura de Quatro Ondas (FWM), com WDM; em fibras **DS**; ocorre *geração de sinais espúrios*;



Efeitos não-lineares -- Resultados Experimentais

➤ Efeitos paramétricos

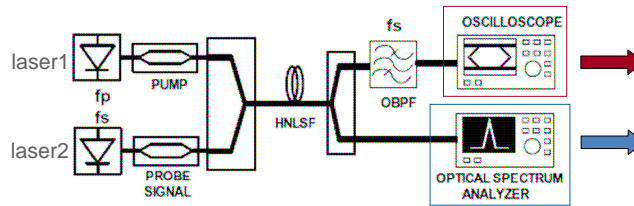
- Mistura de Quatro Ondas (FWM), com WDM, em fibras **SMF**; *não há geração de sinais espúrios*.



Efeitos não-lineares -- Resultados Experim/Simulaç

➤ Efeitos paramétricos (*)

- Mistura de Quatro Ondas (FWM),
- A new technique uses parametric amplification (FWM) in optical fibers to combine two binary signals into a single quaternary amplitude-shift keying (4-ASK) signal.
- We analyze the application of this technique to generate quaternary-amplitude optical packets, that allow the label to be transmitted in the same bandwidth and simultaneously with the payload.



(*) M. Abbade, et al., "Optical amplitude multiplexing through parametric amplification in optical fibers", *Optics Communic.* 283 (2010) 454–463

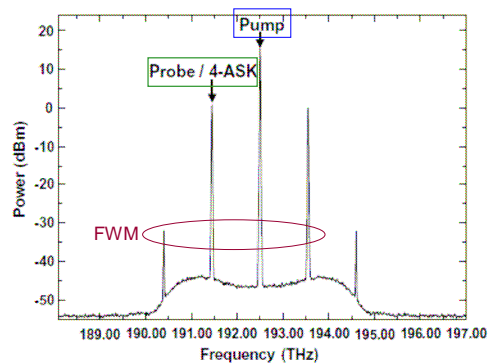
21

Efeitos não-lineares -- Resultados Experim/Simulaç

➤ Efeitos paramétricos

- Mistura de Quatro Ondas (FWM), practical application.

Opt. Spectr. Analyz.
-- FWM wavelengths



22

Efeitos não-lineares -- Resultados Experim/Simulaç

➤ Efeitos paramétricos

- Mistura de Quatro Ondas (FWM),

Modulaç. multinível

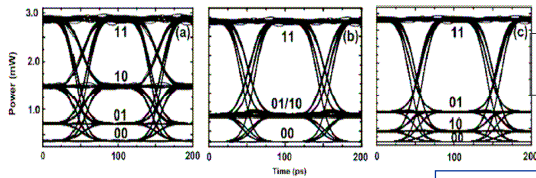


Fig. 5. Eye diagrams for $\alpha_0 = 3$ dB; $\gamma_2 = 5.50$ dB; and $\gamma_1 = 1, 6,$ and 10 dB

quaternary-amplitude traces (eye-diagrams)

11.01.00.01.10

Oscilloscope traces
-- eye-diagrams
-- signal sequences

quaternary-amplitude signals (signal sequences)

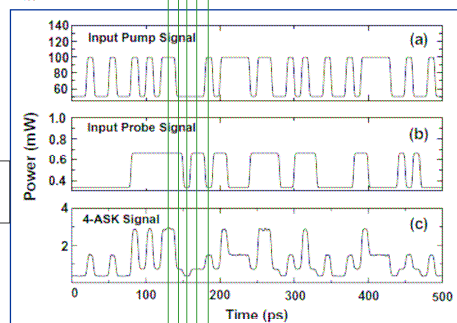


Fig. 3. Binary data at (a) f_p and (b) f_s ; and (c) 4-ASK signal at f_s .

Fim
desta parte

