

ESPALHAMENTO BRILLOUIN EM FIBRA ÓPTICA MONOMODO

Sandro Fonseca Quirino

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LAS)

Instituto de Estudos Avançados (EFO-S)

S J Campos – SP, Brasil

sandro@ieav.cta.br

Antonio Osny de Toledo

Instituto de Estudos Avançados (EAH)

S J Campos – SP, Brasil

osny@ieav.cta.br

Resumo: *Este trabalho foi realizado usando uma fibra óptica monomodo (SMF) de 5 μm de raio, 1500 m de comprimento. O regime de operação do bombeamento foi de 5 mW à 160 mW. A fibra foi bombeada por um laser de Nd:YAG, cw, operando em 1319 nm. Foram coletados espectros de transmissão e retro-espalhamento. A partir dos espectros coletados formou-se um mapa do efeito Brillouin no intervalo de bombeamento, que contém características da relação entre o efeito Brillouin e a potência de bombeamento para esta fibra. Foi analisado a influência do bombeamento no Deslocamento em frequência e na Largura de linha.*

Palavras Chave: Sensor Distribuído a Fibra Óptica, Espalhamento Brillouin, Efeito Doppler, Eletrostricção, Óptica Não Linear.

1. Introdução

O espalhamento Brillouin tem sido amplamente estudado no últimos anos e ainda vem despertando

interesse na áreas de telecomunicação[1], sensores, lasers e amplificadores à fibra óptica[2]. O espalhamento Brillouin divide-se em duas partes, o espalhamento espontâneo e o espalhamento estimulado.

O processo de espalhamento Brillouin espontâneo decorre das flutuações nas propriedades do meio como densidade, permissividade elétrica, índice de refração, etc. Essas flutuações sempre existem, são intrínsecas do meio, portanto sempre ocorre espalhamento, salvo somente quando o meio for idealmente homogêneo[1]. Com o aumento da potência de bombeamento algumas dessas flutuações amplifica-se gerando novos efeitos como a eletrostricção, deformação mecânica do meio devido ao aumento da intensidade do momento de dipolo induzido pelo laser[3].

O processo de espalhamento Brillouin estimulado está diretamente associado com o efeito de eletrostricção que se estabelece após certo nível de bombeamento. A formação dos modos Stokes e anti-Stokes está associada com o efeito Doppler entre a onda eletromagnética e a onda acústica presente no meio. Em termos de frequência, os modos Stokes são aqueles que apresentam menor frequência que a luz incidente, indicando portanto que o meio retém energia, enquanto que os modos anti-Stokes apresenta-se com maior frequência que a do laser, indicando que o meio está cedendo energia.

O termo espontâneo significa que o meio espalha a luz devido as flutuações estatísticas das propriedades do meio a uma temperatura T , fixa. Fisicamente, está associado com o fato de as posições e orientações da moléculas, átomos ou entes em geral, mudarem instante à instante. Estas flutuações podem ser decompostas em termos dos modos normais excitados randomicamente(modos acústicos, vibracionais e rotacionais).

O termo estimulado está associado com o fato de que o efeito de eletrostricção estimula a onda acústica e promove estão o espalhamento Brillouin[4].

2. Procedimento Experimental

A Fig. 1 apresenta esquema experimental usado no presente trabalho. A fibra que sai do laser é emendada com a fibra do isolador óptico que por sua vez é emendada no braço 90% da fibra óptica do acoplador, este por fim tem sua fibra óptica emendada na fibra de teste, uma bobina de 1500 m de comprimento.

O retro espalhamento gerado na fibra teste retorna ao acoplador que direciona 10% deste sinal para ponta 1 do acoplador direcional enquanto os 90% restante perde-se no isolador óptico.

Na ponta 2 sai a luz transmitida livremente e a luz co espalhada, que tem pouco interesse para este trabalho. Com o analisador de espectro óptico na posição 1 foi obtido os espectros para luz retro-espalhada e na posição 2 foi obtido para a luz transmitida e co-espalhada.

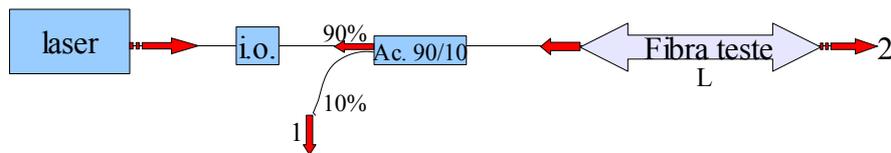


Fig. 1 – Esquema Experimental usado no trabalho.

3 - Resultados Experimentais e Conclusões

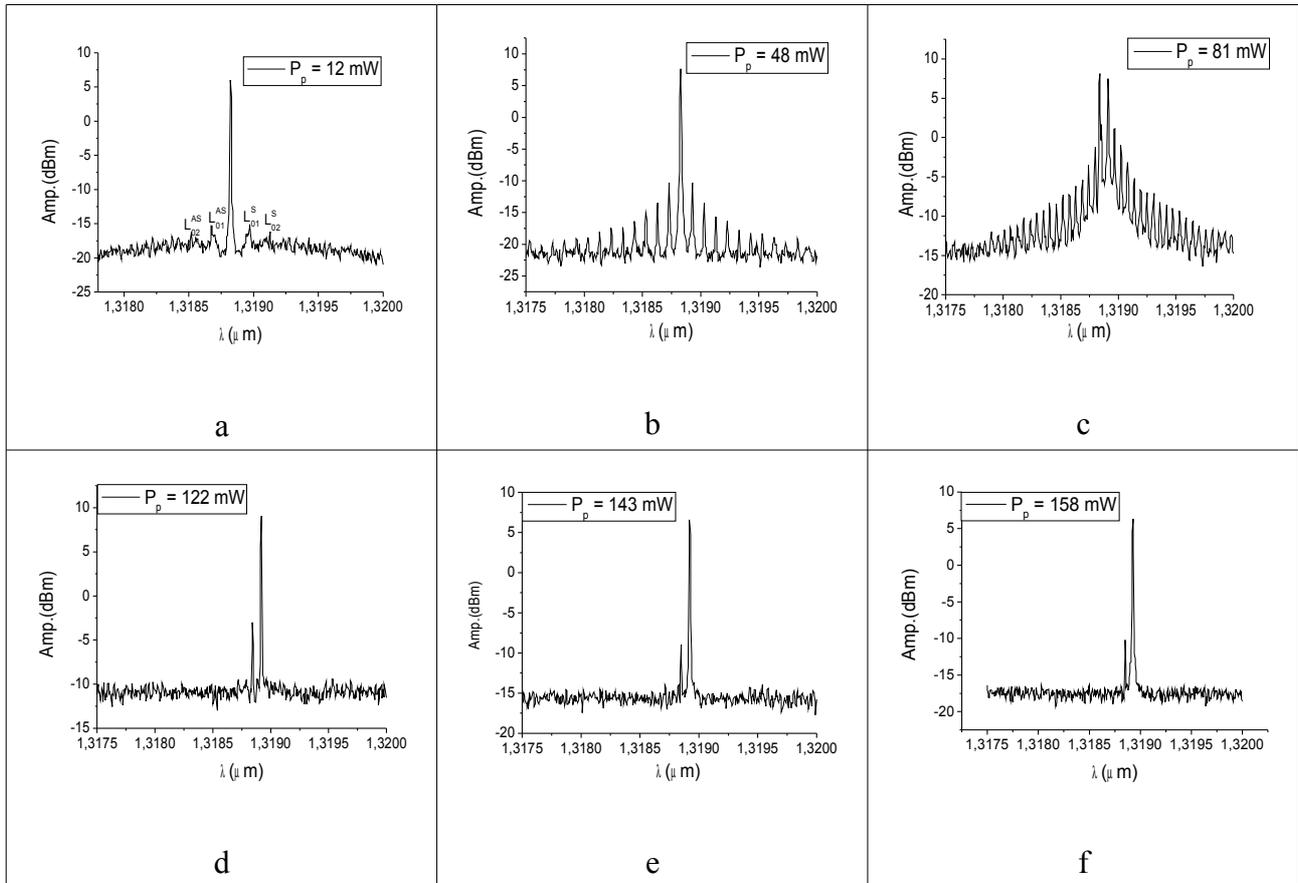


Fig.2- Espectros obtidos para retro-espalhamento Brillouin em função da Potência Incidente.

Os espectros acima revelam a existência de três regiões. A literatura consultada refere-se apenas a duas regiões, espontânea e estimulada, pelo seu interesse em sensores. A terceira região identificada neste trabalho, região de transição, não tem boas características sensoras, sugerindo que este seja o motivo de não haver referências. Neste experimento, 12 mW é a potência incidente que primeiro revela os modos não lineares, nominados de modos L_{0j}^α , onde L significa longitudinal, j representa a ordem do modo e α é “classe” do modo, Stokes ou anti-Stokes, Fig.1(a). No intervalo entre 12 mW e 80 mW de bombeamento o espalhamento é espontâneo, entre 80 mW e 90 mW apresenta-se uma região típica de transição e a partir de 90 mW o processo é estimulado.

A luz incidente de frequência ω_0 é espalhada pelas ondas acústicas presentes no meio, devido ao

efeito Doppler entre ω_0 e ω_{ac} esta nova frequência será deslocada $\Delta\omega$, aqui nominado ω_{01} . Esta nova frequência é influenciada pelo mesmo efeito Doppler gerando uma nova linha $\Delta\omega_{01}$, ou ω_{02} , este processo de “aparecimento de modos” repete-se a medida que aumenta-se a intensidade do bombeamento, o que mais disposição de energia no meio. Portanto, para níveis mais altos de bombeamento, novas bandas surgem.

A simetria no número de modos está associado com o fato de o meio ter o mesmo número de ondas acústicas nas direções co e contra propagante à direção incidente. Os feixes de ordem maior, $(j + 1)$, são obtidos após j reflexões e transmissões consumindo assim mais energia do que aqueles de ordem menor, j . Isto faz com que feixes de maior ordem tenham menor intensidade. Nesta região de espalhamento espontâneo o efeito físico envolvido é o elásto-óptico, onde os fônons envolvidos decorrem das excitações térmicas.

A região de transição é caracterizada por um grande número de bandas, aumento do pedestal relacionado com a orientação das moléculas[5], mesmo intensidade para os sinais Rayleigh e Stokes. A partir de 90 mW o processo é estimulado pela eletrostricção. Efeito na qual um campo elétrico promove tensões no meio gerando ondas acústicas. Essas tensões são proporcionais ao quadrado do campo incidente no meio, $T \approx E^2$. Uma força de eletrostricção tem a seguinte forma $f_{el} \propto \nabla E^2$, ou seja, ela é proporcional ao gradiente da intensidade óptica do campo elétrico presente no meio. Como ilustração veja a figura abaixo:

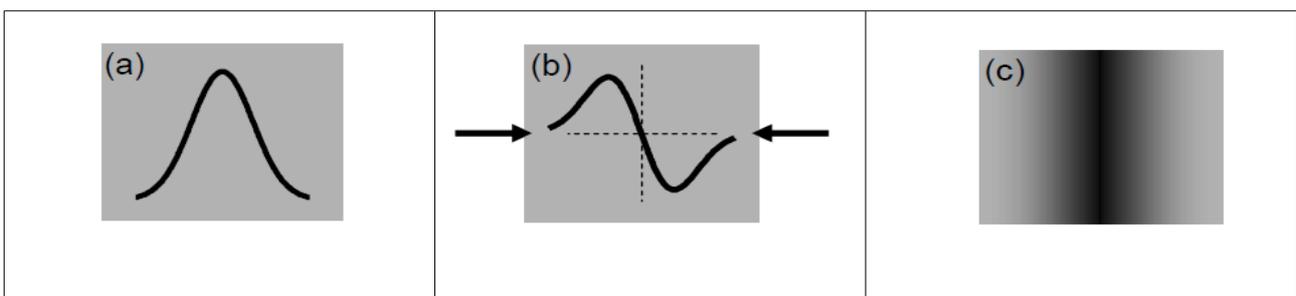


Fig.3 – a) Perfil de Intensidade Óptica, b) Força de eletrostricção, c) Meio Comprimido

A partir do retro espalhamento do feixe incidente, passam a existir dois feixes no meio. Com o

aumento da intensidade de bombeamento os dois aumentam sua intensidade. Como consequência deste fato, dois feixes ocupando o mesmo local do meio material, cada qual com intensidade significativa, ocorrerá interferência entre eles, portanto regiões com diferentes intensidades ópticas.

A partir deste ponto ocorre o efeito de eletrostricção que atua fortemente fazendo com que o meio comprima segundo o perfil da força de eletrostricção. O resultado é que a eletrostricção amplifica a onda acústica que tem mesmo período espacial e comprimento de onda do processo de interferência. Desta maneira apenas um único modo mantém-se no meio já que existe apenas um único padrão de interferência no meio.

A partir destes espectros, Fig.2, podem ser obtidos alguns resultados que permitem mapear o espalhamento Brillouin em função da potência do bombeamento.

Na Fig.4, estão registradas as relações entre o Deslocamento em frequência, a Largura de linha e a Potência dos sinais Rayleigh e Brillouin Stokes e anti-Stokes de primeira ordem como função da potência de bombeamento.

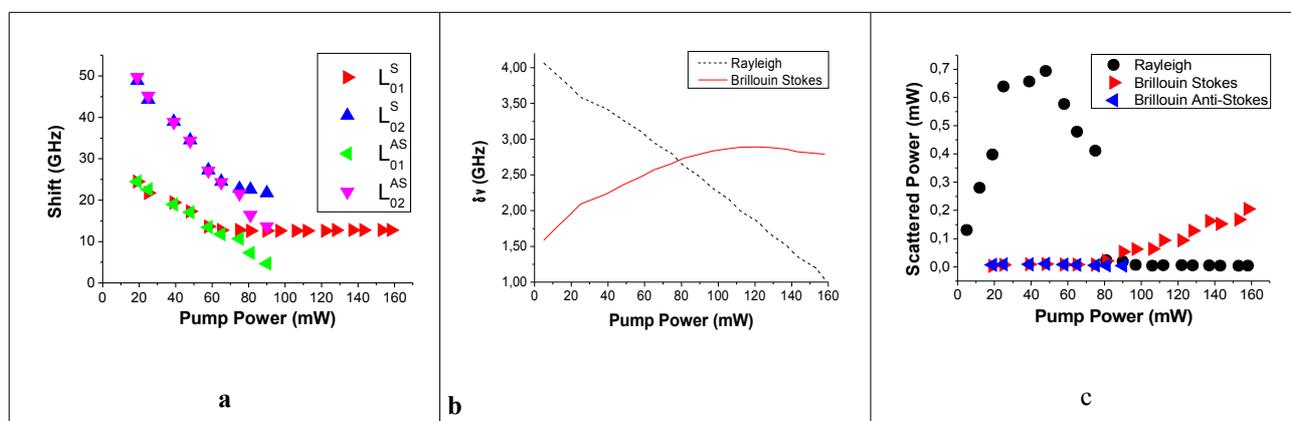


Fig.4 – a) Deslocamento Brillouin em Frequencia, b) Largura de Linha, c) Potência espalhada.

Na Fig.4(a) está representada a distância entre o sinal do laser, representado pelo retro espalhamento Rayleigh, e o sinal Brillouin Stokes e anti-Stokes de primeira e segunda ordem. Esta distância é conhecida, na literatura, com Deslocamento Brillouin em Frequência. Na literatura este deslocamento é de ~ 12 GHz. O gráfico, obtido neste trabalho, mostra que esta grandeza varia significativamente na região espontânea e estabiliza-se, em ~ 12 GHz, na região estimulada. Ele

também revela que os modos mais externos, de segunda ordem, sofrem maior deslocamento que os modos mais internos, de primeira ordem. Portanto o espalhamento Brillouin é sensível a alterações na intensidade do campo elétrico do bombeamento na região espontânea e, estável na região estimulada.

Há uma pequena assimetria entre no deslocamento das linhas Stokes e Anti-Stokes. Essa assimetria está associada com a irregularidade no índice de refração do núcleo[6], como mostra a tab. 1.

Tabela 1. Relação entre os deslocamentos em frequência Brillouin

	L ₀₁	L ₀₂	L ₀₃	L ₀₄
Stokes	24,495GHz	48,823GHz	72,293GHz	96,804GHz
Anti-Stokes	24,490GHz	48,803GHz	72,282GHz	97,584GHz

Esta característica pode ser usado como um “indicador de qualidade” para o índice de refração do núcleo da fibra. Ainda na Fig. 4(a), observa-se que o aumento da amplitude do campo elétrico na fibra óptica altera o deslocamento somente na região de espalhamento espontâneo mas não promove a mesma alteração na região estimulada, sugerindo que a fibra seja imune, dentro deste intervalo de bombeamento, a variações de campo elétrico nesta última região.

A Fig. 4(b) representa a alteração na largura de linha dos sinais Rayleigh e Brillouin Stokes em função da potência de bombeamento. O aumento na largura de linha do sinal Brillouin Stokes indica que o meio está sofrendo alterações mecânicas. A região estável, entre ~ 100 mW 160 mW, é dominada pelo efeito de eletrostricção e não mais pelo efeito acusto-optico. Esta homogeneização mecânica é confirmada pela diminuição da largura de linha do espalhamento Rayleigh que está diretamente ligado as inomogeneidades do meio.

Na Fig.4(c) cada ponto representa a potência de pico dos sinais Rayleigh e Brillouin Stokes e anti-Stokes de primeira ordem. Na região espontânea apenas a intensidade do espalhamento Rayleigh altera-se enquanto os sinais Brillouin Stokes e anti-Stokes mantem-se contantes, em

intensidade. Isto está relacionado com o fato de que o efeito de eletrostricção, que amplifica a onda acústica, ser desprezível, sendo o espalhamento Brillouin decorrente do efeito acústo-óptico que não privilegia a linha Brillouin Stokes.

Na região de espalhamento estimulado a intensidade do sinal Brillouin Stokes aumenta linearmente enquanto a intensidade do sinal Brillouin anti-Stokes mistura-se com a intensidade do ruído do espectro. A intensidade do espalhamento Rayleigh, que não está relacionado com a onda acústica e sim com inhomogeneidades fixas no meio, estabiliza-se, revelando sua independência com a onda acústica.

4 – CONCLUSÕES

Este trabalho permite conhecer o Efeito Brillouin nas regiões espontânea e estimulada, Na região espontânea o deslocamento em frequência é sensível à alterações no bombeamento e a intensidade Stokes é insensível, enquanto na região estimulada o deslocamento em frequência é insensível a alterações no bombeamento e a intensidade é sensível a estas alterações.

Estas conclusões *sugerem* que o efeito Brillouin, no regime espontâneo, em fibra óptica monomodo não mantenedora de polarização, pode ser usado como sensor de alterações na intensidade do campo elétrico local.

5 – REFERÊNCIAS

[1] - R. G. Smith, “**Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering,**” Appl. Opt.11, 2489-2494 (1972).

[2] - A. Liem, J. Limpert, H. Zellmer, and A. Tünnermann, “**100-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier,**” Opt. Lett. 28, 1537-1539 (2003).

- [3] - Y. Sun, W.W. Cao and L.E. Cross, “**Electrostriction effect in Glass,**” Materials Letters. 4, 329-336 (1986).
- [4] - P. C. Dainese Jr., H. L. Fragnito, “**Espalhamento Brillouin em Fibra Fotônicas,**” Universidade Estadual de Campinas, Tese Doutorado – (2006).
- [5] - R.W. Boyd, “**Nonlinear Optics,**” Academic Press 2 ed., Ins. of Optics - Rochester N.Y., (2003).
- [6] - G.Qin, T.Suzuki, Y. Ohishi, “**Power dependence of Brillouin linewidths in a silica fiber,**” CLEO/QELS – 2008.