

文章编号: 0258-7025(2003)08-0701-04

窄线宽与宽线宽受激布里渊散射过程的 图示化描述

葛传文, 张为俊, 高晓明

(中国科学院安徽光学精密机械研究所激光光谱学开放实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 利用光压原理对激光稳态受激布里渊散射(SBS)过程中声子波密度光栅的非线性演变情况作了图示化的深入分析,并直观地解释了稳态窄线宽SBS与稳态宽线宽SBS的特性差异。

关键词 非线性光学;非线性演变;光压;密度光栅;稳态窄线宽SBS;稳态宽线宽SBS

中图分类号 O 437 **文献标识码** A

Illustrated Description of Narrow-band and Broad-band Stimulated Brillouin Scattering Process

GE Chuan-wen, ZHANG Wei-jun, GAO Xiao-ming

(Laser Spectroscopy Open Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract This paper illustratively analyzes the nonlinear evolution of phonon-wave density grating in a stimulated Brillouin scattering (SBS) process by using the principle of light forces, and discusses the characteristic difference between steady-state narrow-band SBS and steady-state broad-band SBS.

Key words nonlinear optics; nonlinear evolution; light forces; density grating; steady-state narrow-band SBS; steady-state broad-band SBS

1 引言

根据电磁波理论,受激布里渊散射(SBS)介质在高功率入射激光的高频电场感应下,形成高频交变电流,此电流始终与光波磁场相垂直,它将受到一个洛伦兹力的作用,由于洛伦兹力始终沿着入射光波的坡印廷矢量 $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$,即入射波的传播方向,因此介质所受到的光压方向也即入射波的传播方向。可以说光压现象是光场电致伸缩效应的具体表现。在光压的作用下,介质将被局部地瞬间压缩,且压缩面始终与入射光波的波前即等相面相吻合。由于光波强度所固有的周期波动性,激光将沿着传播路径每隔二分之一波长产生一个压缩面,每个压缩面即为一个独立的声子波面。相对于极高速传播的激光来说,低速传播的声子波面可视为静止。因

此,当高功率密度激光通过介质时,瞬间内便能共振激起大量的压缩面,通常所说的声子波密度光栅便是由这些等间隔的压缩面排列而成,所以这些压缩面(或声子波面)也可称为栅面。

在理想条件下,如入射激光足够强时,平面波将激起平面形栅面的密度光栅,球面波将激起球面形栅面的密度光栅。而波前不规则的入射光波则会相对应地激起一种不规则形栅面的密度光栅,这种密度光栅具有复杂的结构,可分解为不同方向、不同栅面面形的众多子密度光栅的组合,它们的总反射效果就是所有子密度光栅反射作用的合成。所有后向反射光在入射光光路的任一横截面上重新汇集时,便能恢复入射光在此截面上的原波前,从而实现SBS的相位共轭,即波前反转过程。

收稿日期:2002-04-27;收到修改稿日期:2002-06-28

作者简介:葛传文(1968—),男,中国科学院安徽光学精密机械研究所光学专业毕业,获中国科学院研究生院理学博士学位,主要从事非线性光学相位共轭及激光技术的研究。E-mail:gcwen@hotmail.com

2 栅面与邻近区域的密度对比度同入射激光线宽的关系

介质中,光栅栅面的密度对比度对应于叠加光场的强度对比度,也即叠加光场的强度条纹对比度。下面简单推导此对比度与激光线宽 $\Delta\lambda$ 之间的关系。

考虑一维叠加光场中的某一点(z)处,波长为 λ_i 到 $\lambda_i + d\lambda_i$ 的激光的叠加强度为^[1]

$$dI = \bar{I}_0 \cos^2(m - k)\pi d\lambda_i$$

式中 $\bar{I}_0 = I_0/\Delta\lambda$ 为波段 $\Delta\lambda$ 内的平均光密度, m 为最短波长 λ 在 z 点处的干涉级, $k = m - m_i$ 为波长 λ 和 λ_i 的干涉级差值, 即有 $m = \Delta(z)/\lambda, k = (\lambda_i - \lambda)\Delta(z)/\lambda\lambda_i \approx (\lambda_i - \lambda)\Delta(z)/\lambda^2$, 这里 $\Delta(z) = n z - n_i z$ 为波长 λ 和 λ_i 从 $z = 0$ 点到 $z = z$ 点的光程差, n 和 n_i 分别为波长 λ 和 λ_i 的激光在介质中的折射率。所以整个 $\Delta\lambda$ 波段在 z 点处的叠加光强为

$$I = \int dI = \bar{I}_0 \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} \cos^2(m - k)\pi d\lambda_i = \bar{I}_0 \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} \cos^2\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{\lambda_i - \lambda}{\lambda^2}\right)\Delta(z)\pi d\lambda_i = I_0 \left\{ 1 + \frac{\sin[\pi\Delta\lambda\Delta(z)/\lambda^2]}{\pi\Delta\lambda\Delta(z)/\lambda^2} \cos \frac{2\pi\Delta(z)}{\lambda} \right\} \quad (1)$$

由(1)式可得强度条纹对比度的表达式为

$$\gamma = \left| \frac{\sin[\pi\Delta\lambda\Delta(z)/\lambda^2]}{\pi\Delta\lambda\Delta(z)/\lambda^2} \right| \quad (2)$$

对于单色激光, $\Delta\lambda = 0, \Delta(z) = 0$, 所以始终有 $\gamma = 1$; 而对于宽线宽激光, 则 $\gamma < 1$, 并且 $\Delta\lambda$ 越大, γ 越小。如图 1 所示, 为窄线宽(近单色)和宽线宽激光, 在介质中形成的叠加光场的强度条纹的对比度 γ 随传播距离 z 的变化情况。

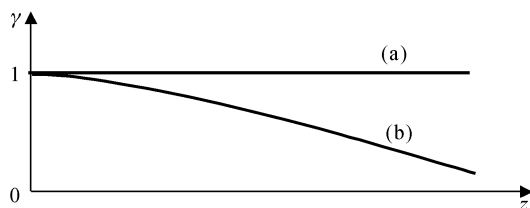


图 1 合成光场强度条纹对比度随传播距离的变化
(a) 窄线宽; (b) 宽线宽

Fig. 1 Relationship between intensity fringe contrast (γ) and propagating distance (z)
(a) narrow-band; (b) broad-band

3 稳态窄线宽和宽线宽 SBS 过程中的密度光栅

下面以平面波脉冲激光为例,用直观图示法分

析稳态窄线宽 SBS 和稳态宽线宽 SBS 过程中声子波密度光栅的不同特性。

3.1 稳态窄线宽 SBS 声子波密度光栅的特性

稳态 SBS 情况下,激光脉冲的脉宽(几十纳秒以上)远大于介质声学声子寿命(其大小由介质性质决定,一般为 1 ns 左右^[2]),在相对短暂的声子寿命内,激光强度振幅变化很小,可近似为常量,满足慢变振幅近似条件^[3]。

入射的平面窄线宽激光脉冲经透镜聚焦到 SBS 介质中,假设在聚焦区内光功率密度足够大,且激光高速穿行时激起的声子波面相对静止。激光波长为 λ , 脉冲的积分强度(I)-时间(t)波形如图 2 所示,一般 PIN 管等光电探测器采集的就是这种波形。此波形下面所画的众多小尖峰脉冲表示不同时刻激起的声子波,它们的寿命都远小于激光脉宽。

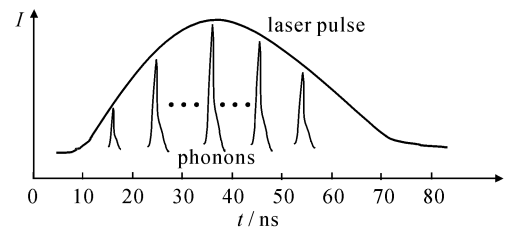


图 2 激光脉冲的积分强度(I)-时间(t)波形
Fig. 2 Integrated intensity (I)-time (t) waveform of laser pulse

在单个声子寿命期内激光的振幅(E)-距离(z)波形近似为图 3(a)所示的正弦波,相应的光强(EE^*)-距离(z)波形如图 3(b)所示。由于光压作用,每个光强峰值位置都会产生一个压缩面(声子波面),在一个瞬间内形成一批平行压缩面构成一个声子波密度光栅,如图 3(c)所示。在激光脉冲的整个抽运过程中,将此起彼伏地产生许多批声子波,每一批声子波的产生、增强、直至衰灭都对应于一个声子波密度光栅的产生、增强与衰灭,所以密度光栅的寿命等同于单个声子的寿命。且在激光脉冲的峰值期内产生的声子波密度光栅最强,而脉冲前后沿所激起的密度光栅则相对较弱,如图 2 所示。

窄线宽激光具有很长的相干长度,在 SBS 介质中传播时色散小,光子群始终能保持很高的步调一致性,产生的声子波光栅栅面密度较大,且随传播距离的变化小。

3.2 稳态宽线宽 SBS 声子波密度光栅的特性

稳态宽线宽 SBS 情况下,慢变振幅近似条件仍成立,即在声子的产生与衰灭过程中,激光强度振幅

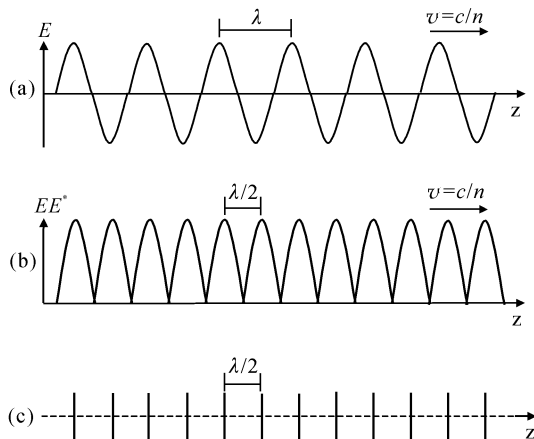


图 3 稳态窄线宽激光 SBS 过程中密度光栅的形成与演变示意图

(a) 单个声子寿命期内激光的振幅 (E)-距离 (z) 波形; (b) 振幅光强 (EE^*)-距离 (z) 波形; (c) 一个瞬间内同时形成的一批平行压缩面构成一个声子波密度光栅

Fig. 3 Schematic of formation and evolution of density grating in steady-state narrow-band SBS process

(a) amplitude (E)-distance (z) waveform during a phonon life; (b) amplitude intensity (EE^*)-distance (z) waveform; (c) series of facets compressed in a moment forming a phonon density grating

的变化很小,可近似为常量。宽线宽激光脉冲经透镜聚焦到 SBS 介质中,假定激光波长范围从 λ 到 $\lambda + \Delta\lambda$,在沿一维 z 轴传播时,不同频率成分将迅速色散而错开,其振幅 (E)-距离 (z) 波形如图 4(a) 所示,这里暂且假设激光中不同频率成分光振幅相同,图 4(b) 所示为相应的光强 (EE^*)-距离 (z) 波形,叠加光场将形成图 4(c) 所示的声子波密度光栅,它是各频率成分光瞬间形成的压缩面的叠合。随着距离 z 的增大,各频率成分光的压缩面离散,造成叠合栅面的密度与其前后邻近区域介质密度之间的差值越来越小,折射率差值也随之变小,最终导致声子波密度光栅的总反射率降低。图 4(c) 以栅面颜色的深浅表示其密度的大小,颜色越浅密度越小。

4 声子波密度光栅的反射特点及非线性演变过程的分析

在入射激光 L 的强度保持不变的慢变振幅近似条件下,讨论三个相邻栅面之间的相互作用情况,可近似假设栅面具有相同的反射率、透射率以及相同的演变增强过程。在栅面形成之初,各栅面的迎光面所受到的瞬时激光光压总是大于其背光面,所以迎光面密度大于背光面,使各迎光面的反射率 R_1^- ,

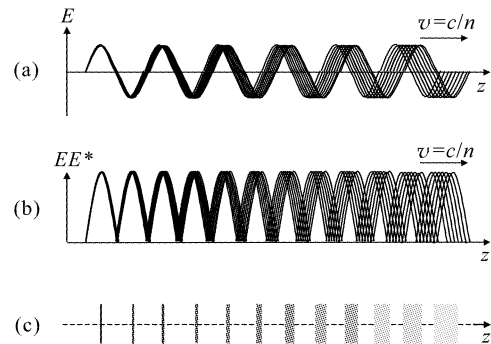


图 4 稳态宽线宽激光 SBS 过程中密度光栅的形成与特性示意图

(a) 相互作用区内不同频率成分激光的振幅 (E)-距离 (z) 波形的色散情况; (b) 相应的光强 (EE^*)-距离 (z) 波形色散情况; (c) 一个瞬间内各频率成分形成的平行压缩面所叠合成的声子波密度光栅

Fig. 4 Schematic of formation and characteristic of density grating in steady-state broad-band SBS process

(a) dispersion waveform of amplitude (E) vs distance (z); (b) dispersion waveform of intensity (EE^*) vs distance (z); (c) series of facets compressed in a moment by different frequency component laser form a phonon density grating

R_2^-, R_3^- 总是大于各背光面的反射率 R_1^+, R_2^+, R_3^+ (这里的上标一和十分别表示沿 $-z$ 和 $+z$ 方向),如图 5 所示。三个栅面的后向总反射光总是大于前向总反射光,以此类推到所有栅面组成的密度光栅,便能很好地解释 SBS 过程中后向斯托克斯光大于前向反斯托克斯光的原因。

声子波密度光栅的形成是一个非线性增强过程,因为随着其栅面的前后向反射率的增大,栅面的前后面所受到的光压也随之增大(光压与反射光反向,但大小正比于反射光强),引起光栅密度增大,密度的增大又反过来进一步引起前后向反射率的增大,……,如此反复。在受激散射的条件下,栅面与栅面之间就是这样通过各自的反射光而相互作用、相互增强,造成密度光栅总反射率呈指数规律迅速增大,合作完成由弱变强的非线性受激布里渊散射过程。

5 结论

在光压的作用下,高功率密度激光通过介质时,将沿其传播路径每隔二分之一波长产生一个压缩面,瞬间内激起的大量压缩面排列后便形成一个声子波密度光栅,所以压缩面也可称为栅面。每个栅面上的介质密度皆大于其邻近的前后区域,存在折

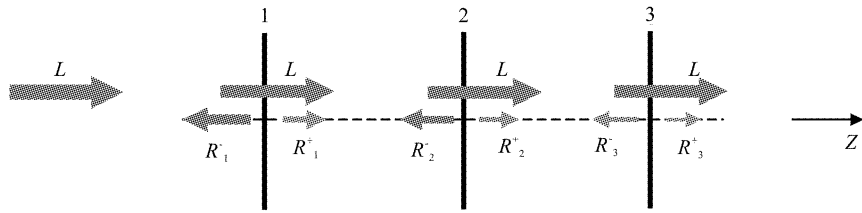


图 5 三个相邻栅面之间的相互作用情况

Fig. 5 Interaction among three contiguous grating facets

射率差,所以栅面具有反射作用,其反射率的大小近似地与折射率差值的平方成正比^[4]。所有栅面的反射率之和便是声子波密度光栅的总反射率。在介质中传播时,稳态窄线宽激光所形成的各个栅面的密度对比度都较高,而稳态宽线宽激光由于色散严重,其形成的栅面的密度对比度随传播距离的增大迅速降低,造成其密度光栅的总反射率也大大变小,这便是稳态宽线宽 SBS 过程具有更高阈值和更低共轭反射率的原因。

相对于复杂的非线性耦合波方程理论,图示化描述方法在分析稳态 SBS 过程时,具有更加明晰的物理图像,更有利于直观理解。

参 考 文 献

- 1 Fan Shaoqin, Guo Fuchang. Physical Optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. 54~58 (in Chinese)
- 2 M. J. Damzen, Henry Hutchinson. Laser pulse compression by stimulated Brillouin scattering in tapered waveguides [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **QE-19**(1):7~14
- 3 Y. R. Shen. The Principles of Nonlinear Optics [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1984
- 4 Gong Zutong, Li Jingzhen. Optics Handbook [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1986. 639~641 (in Chinese)

第九届中国国际激光及光电子产品展览会 (ILOPE 2004)

由国务院批准创办的“中国国际激光及光电子产品展览会”(英文简写“ILOPE”)是中国最早创办,最具代表性和影响力的国际专业光电贸易展会。2004年4月27~30日,第九届中国国际激光及光电子产品展览会将在中国北京国际展览中心举行。

主办单位 中国国际贸易促进委员会,中国光学光电子行业协会,中国国际展览中心集团公司

承办单位 中国光学光电子行业协会,中展集团北京华港展览有限公司

支持单位 信息产业部,国家科学技术部,中国科学院,中国兵器工业集团公司,亚太经济合作组织

展品大类 光电材料和元件,激光器与应用,光通讯产品,显示技术及设备,光信息产品,光学仪器,红外、传感技术等相关应用

展位规格及价位表

类 型	国内企业	国外企业
	及国内产品	及国外产品
标准展位(起租 9 m ²)	¥6750 元/9 m ²	US \$ 3600 元/9 m ²
室内光地(起租 18 m ²)	¥650 元/m ²	US \$ 350 元/m ²

优惠办法 (1) 凡在 2003 年 11 月 15 日前报名的企业可享受 5% 的优惠。(2) 凡参加过 ILOPE2002, 2001 和 ILOPE2000 的企业以及中国光学光电子行业协会的会员单位均可享受 5% 的优惠(可累加)。

联系方式

中展集团北京华港展览有限公司:

方 芳,刘宝存,梁 晨

电话:(010)84600344,84600339,84600335

传真:(010)84600325,84600346

电子邮件:fang@ciec-exhibition.com,

lc@ciec-exhibition.com

中国光学光电子行业协会:

所洪涛

电话:(010)64362211-490

传真:(010)64347322

电子邮件:COEMA@PUBLIC2.BTA.NET.CN

展会网址:www.ilope-expo.com