

文章编号: 0258-7025(2008)05-0690-04

液态介质纵向振动对受激布里渊散射 反射性能的影响

巴德欣 吕志伟 朱成禹 王雨雷 王双义

(哈尔滨工业大学光电电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 结合静态流体力学理论、弦振动理论及瞬态受激布里渊散射(SBS)理论,建立了描述介质纵向振动所产生的附加密度变化的受激布里渊散射耦合模型。以四氯化碳为介质,研究了不同强度的基频及倍频振动对受激布里渊散射反射率以及波形失真度的影响特征。结果表明,振动对于受激布里渊散射的影响具有一定的阈值性。在低于某一阈值情况下,受激布里渊散射稳定性不受其影响,且受激布里渊散射的振动稳定性在很大程度上受控于受激布里渊散射装置的结构参数。在介质振动强度恒定的情况下,选取短焦距透镜及短池长的装置结构更有利于受激布里渊散射相位共轭镜稳定性的提高。

关键词 非线性光学;受激布里渊散射;振动;波形;反射率

中图分类号 O 437.2 文献标识码 A

Influence of Longitudinal Vibrating of Media on Stimulated Brillouin Scattering

Ba Dexin Lü Zhiwei Zhu Chengyu Wang Yulei Wang Shuangyi

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract Stimulated Brillouin scattering (SBS) can be utilized in laser systems to improve alignment stability. The stability of SBS is a key factor of limiting the system stability. Combining with the theory of hydrodynamics, vibrating string and transient SBS, a new SBS model with longitudinal vibrating of media is established. The eigenvalue of vibrating is obtained by solving the model. Basing on the model, the influence of longitudinal eigenvibrating and harmonic vibrating of tetrachloride with different intensities on the Stokes beams is investigated theoretically. The result shows that the influence of vibration on SBS has a certain threshold. When the intensity of vibration is less than some value, the stability of SBS is not affected. Another numerical simulation is carried out to research the dependence of stability on the configuration of SBS. It shows that the stability is enhanced when choosing lenses with shorter focus and shorter media cell.

Key words nonlinear optics; stimulated Brillouin scattering; vibration; waveform; reflectivity

1 引言

机械振动是影响激光系统输出光质量的一个重要因素。将受激布里渊散射(SBS)相位共轭镜应用于激光系统中,由于其背向散射光具有自对准的特性,从而具有抵御外界环境振动的能力^[1,2]。液态介质是目前应用最为广泛的受激布里渊散射介质类

型。相对于气态介质,液态介质具有使用方便、安全性好、增益大、反射率高的优点;相对于固态介质,具有成本低、抗损伤阈值高的优点^[3]。因此,液态介质成为激光系统“抗振器”的受激布里渊散射的首选介质类型^[4~7]。受激布里渊散射本身的抗振动能力,是决定受激布里渊散射“抗振性”的关键。本文建立

收稿日期:2007-09-02;收到修改稿日期:2007-11-30

基金项目:国家自然科学基金(10476009,60478020)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助项目。

作者简介:巴德欣(1982—),男,黑龙江人,博士研究生,主要从事高功率激光及非线性光学方面的研究。

E-mail: xlbxdx@126.com

导师简介:吕志伟(1961—),男,辽宁人,教授,主要从事非线性光学、固体激光技术和光电控制技术等领域的研究。

E-mail: zhiweilu@yeah.net

了用于讨论液态介质纵向振动对受激布里渊散射反射特性影响规律的理论模拟平台, 针对受激布里渊散射相位共轭镜在主振荡功率放大(MOPA)^[8]、运动目标跟踪^[9]等方面的应用, 可为研究如何提高其抗振性能, 从而提高可靠性及实用性提供一定的理论基础。

2 理论模型

2.1 液态介质纵向振动模型

为简化模型, 假设介质中仅存在纵向振动, 且液体充满介质池, 介质的横截面积不变。以一维弦振动模型为例, 设纵向为 z 轴方向, 在某一振动时刻, z 点处的介质的位移为 $U(z)$, 则对于介质微元 Δz , 根据绝热弹性模量的定义, 此微元所受压力为

$$\Delta P = -\frac{1}{\beta} \frac{\Delta V}{V} = -\frac{1}{\beta} \frac{U(z + \Delta z) - u(z)}{\Delta z}, \quad (1)$$

式中 β 为介质的绝热弹性模量, 令 $E = 1/\beta$, 当 $\Delta z \rightarrow 0$ 时, 有

$$dP = -E \frac{dU}{dz} = -EU_z, \quad (2)$$

将(2)式结合牛顿第二定律, 可得出液体存在纵向振动时质点位移须满足的微分方程

$$U_{zz} = a^2 U_{zz}, \quad (3)$$

式中 $a = \sqrt{E/\rho_0}$ 为介质内由振动产生的附加密度波的速度。在密度变化远小于 ρ_0 时, 可认为液体两端不离开介质池的两端。即(3)式满足边界条件

$$U(0, t) = U(l, t) = 0, \quad (4)$$

式中 $z = 0$ 和 $z = l$ 分别表示介质池的两个端点。结合(3)和(4)式, 可得出介质池中可能存在的本征振动模式

$$U_n(x, t) = \left(A_n \cos \frac{n\pi at}{l} + B_n \sin \frac{n\pi at}{l} \right) \sin \frac{n\pi z}{l}, \quad (5)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

式中系数 A_n 和 B_n 可由系统的初始条件解出。根据流体连续性方程, 有

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \frac{\partial V}{\partial z}, \quad (6)$$

可得出用介质密度变化描述的纵向振动模式的表达式

$$\rho_n = E_n \cos \frac{n\pi at}{l} \cos \frac{n\pi z}{l} + F_n \sin \frac{n\pi at}{l} \cos \frac{n\pi z}{l}. \quad (7)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

根据三角公式, (7)式可以化为带有初相位的正(余)弦形式。所以, 在数据模拟中, 仅对其中的正弦分量进行模拟, 这种处理可在不失代表性的前提下, 简化

计算量, 易于对结果进行分析。

2.2 含纵向振动项的受激布里渊散射耦合模型

高斯单位制的波动方程为

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \frac{\gamma_c}{c^2 \rho_0} \frac{\partial^2 (\rho \mathbf{E})}{\partial t^2}. \quad (8)$$

设介质中的光场为

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_L + \mathbf{E}_S = \frac{1}{2} \mathbf{a}_L E_L(z, t) e^{-i(\omega_L t + k_L z)} + \frac{1}{2} \mathbf{a}_S E_S(z, t) e^{-i(\omega_S t - k_S z)} + \text{c. c.} \quad (9)$$

介质中的声波场用介质密度的变化量表示为

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 = \frac{1}{2} \rho_a(z, t) e^{-i(\Omega t + \varphi)} + \text{c. c.} + \rho_2, \quad (10)$$

式中 ρ_1 为受激布里渊散射作用产生的超声场, ρ_2 为由介质振动所产生的密度波动。利用液态介质纵向振动模型进行描述, 设抽运光与斯托克斯光具有相同的偏振态, 可按标量处理。将(9)、(10)式代入(8)式, 并应用慢变化振幅近似, 忽略到频率失配项, 得

$$\frac{\partial E_L}{\partial z} - \frac{n}{c} \frac{\partial E_L}{\partial t} = -\frac{i\gamma_c \omega_L}{4cn\rho} \rho_a E_S - \frac{i\omega_L \gamma_c}{2cn\rho} \rho_2 E_L, \quad (11a)$$

$$\frac{\partial E_S}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_S}{\partial t} = \frac{i\gamma_c \omega_S}{4cn\rho} \rho_a^* E_L + \frac{i\omega_S \gamma_c}{2cn\rho} \rho_2 E_S, \quad (11b)$$

其中, ρ_a 在忽略朗之万噪声项时可描述为^[10]

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial z} + \frac{1}{2} \Gamma \rho_a = i \frac{rq^2}{16\pi\Omega} E_L E_S^*, \quad (12)$$

对于 ρ_2 , 取

$$\rho_2 = F_n \sin \frac{n\pi at}{l} \cos \frac{n\pi z}{l}, \quad (13)$$

(11)~(13)式构成了用于讨论存在纵向振动的液态介质受激布里渊散射的瞬态空间一维耦合波方程组。

3 数值模拟结果与分析

对理论模型进行数值模拟, 选用受激布里渊散射共轭镜中较为常用的四氯化碳溶液(吸收系数 0.004 cm^{-1} , 增益 6 cm/GW , 声子寿命 0.6 ns , 折射率 1.46) 作为介质; 抽运激光的参数: 波长为 1064 nm 的时域高斯型脉冲, 峰值功率为 1 MW , 脉宽为 20 ns , 发散角为 0.8 mrad 。

从能量反射率和波形失真度两个方面衡量振动对于受激布里渊散射反射镜的反射性能的影响。其中, 能量反射率采用通用定义: 即输出的斯托克斯光的能量与注入抽运光能量之比。波形失真度的定义

为:将无振动条件下的斯托克斯输出功率波形与加入振动后的斯托克斯输出波形分别除以其最大值进行归一化,然后对波形进行采样,求均方差。

3.1 不同强度的本征振动对受激布里渊散射反射性能的影响

在模拟中,采用的受激布里渊散射的结构参数为:池长20 cm,透镜焦距10 cm,镜池间距0 cm。结果如图1所示,其中图1(a),(b)代表基频振动,(c),(d)为二倍频振动。可以看出,无论是基频振动还是二倍频振动,在振动幅度低于约 10^{-5} (即 $F_n \leq 10^{-5}$)时,振动对受激布里渊散射的性能几乎没有影响。随着振动幅度的提高,波形失真度提高,反射率下降,且二者的稳定性变差。此外,还开展了对三倍频至五倍频的模拟,得到相似的输出波形失真度及反射率的变化趋势,但尚未发现各频率谐波之间有相应的关系。

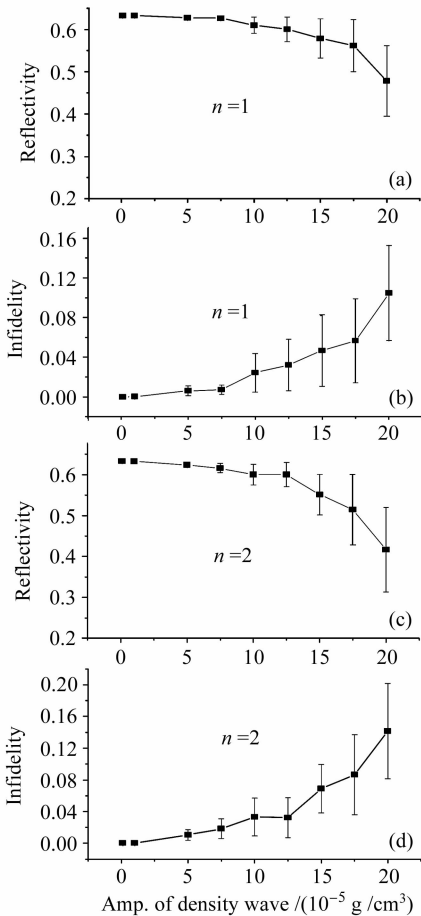


图1 不同强度的本征振动对斯托克斯光的影响

Fig. 1 Influence of eigenvibrating with various intensities on the Stokes beams

3.2 焦距对受激布里渊散射抗振性能的影响

结构参数为:池长20 cm,镜池间距0 cm,透镜

焦距0.3~13.2 cm,振动幅值 10^{-4} g/cm³。结果如图2所示,随透镜焦距的增加,波动作用长度加大,不稳定性提高。因此,在不产生波形调制现象的前提下,适当地采用短焦透镜,有利于提高受激布里渊散射共轭镜的抗振性能。

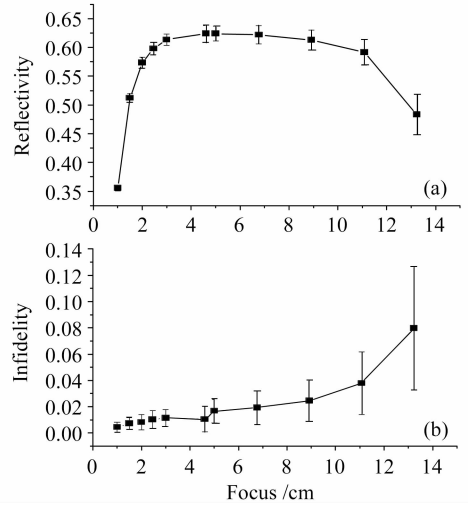


图2 焦距对受激布里渊散射抗振性能的影响

Fig. 2 Influence of focus on the stability of SBS

3.3 池长对受激布里渊散射抗振性能的影响

所选参数为:透镜焦距10 cm,镜池间距0 cm,池长从15 cm增加到50 cm,振动幅值 10^{-4} g/cm³。结果如图3所示,池长增加,波动表达式中的 $\cos(n\pi z/l)$ 变大,其本质为振动强度变大,从而使不稳定性提高。但据此尚不能得出池长增加稳定性变差的结论,对于具体的系统,还应考虑池长增加对振动强度的影响。

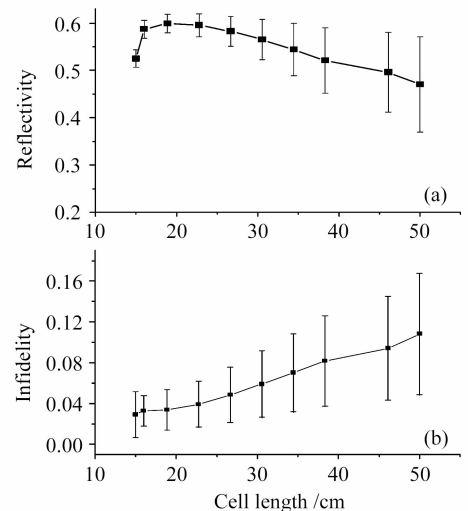


图3 池长对受激布里渊散射抗振性能的影响

Fig. 3 Influence of the cell length on the stability of SBS

4 结 论

建立了用于讨论液态介质纵向振动对受激布里渊散射反射特性影响规律的理论模拟平台。对液态介质纵向本征振动的模拟表明本征振动的影响呈现以下特征:

1) 振动对于受激布里渊散射的影响具有一定的阈值性。在低于某一阈值情况下,受激布里渊散射稳定性不受其影响;高于此阈值,反射性能变差。

2) 受激布里渊散射的振动稳定性受控于受激布里渊散射装置的结构参数。在介质振动强度恒定的情况下,选取短焦透镜及短池长的装置结构,将有利于受激布里渊散射相位共轭镜稳定性的提高。

参 考 文 献

- 1 Chen Jun. Optic Phase Conjugation and Application [M]. Beijing: Science Press, 1999. 234~235
陈 军. 光学位相共轭及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 234~235
- 2 Eduard Gregor, David W. Mordaunt, Steven C. Matthews *et al.*. Engineering aspects of solid-state phase conjugate lasers [C]. *SPIE*, 1992, **1627**:65~73
- 3 Hasiwuliji, Lü Zhiwei, He Weiming *et al.*. The new liquid mediums for stimulated Brillouin scattering [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3):311~314
哈斯乌力吉, 吕志伟, 何伟明等. 受激布里渊散射的新介质[J]. 激光技术, 2005, **29**(3):311~314
- 4 H. J. Eichler, A. Haase, R. Macdonald *et al.*. Nd:YALO-amplifier above 100 watts average output power with high beam quality via phase conjugation [C]. Proceedings of IEEE Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications-Conference, 1994. 356~357
- 5 Liu Danping, Hu Yu. Experimental study of overcoming laser rod's thermal effect with stimulated Brillouin scattering phase conjugation mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):184~187
刘丹平, 胡 渝. 利用受激布里渊散射相位共轭镜克服激光棒热效应的实验研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(2):184~187
- 6 Lü Zhiwei, Hasiwuliji, He Weiming *et al.*. Experimental study on a two-cell stimulated Brillouin scattering system with tunable pulse duration and high power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1327~1331
吕志伟, 哈斯乌力吉, 何伟明等. 高负载脉宽可调双池受激布里渊散射系统的实验研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(11):1327~1331
- 7 Brian Thurow, Naibo Jiang, Mo Samimy *et al.*. Narrowlinewidth megahertz-rate pulse-burst laser for high-speed flow diagnostics [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(26):5064~5073
- 8 Youlun Ju, Baoquan Yao, Sheng Qi. High power 1.57 μm OPO pumped by MOPA with SBS [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(6):358~360
- 9 Ju Youlun, Chen Deying, Yu Xin *et al.*. Investigation of laser tracking and pointing at moving target in track with stimulated Brillouin scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1):88~92
鞠有伦, 陈德应, 于 欣等. 利用受激布里渊散射实现在轨运动目标激光跟踪瞄准研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(1): 88~92
- 10 Robert W. Boyd, Kazimierz Rzazewsky, Paul Narum. Noise initiation of stimulated Brillouin scattering [J]. *Phys. Rev. A*, 1990, **42**(9):5514~5521