

文章编号: 1001-3806(2002)05-0375-04

## 光学元件中受激布里渊散射的研究状况及进展<sup>\*</sup>

葛自明 吕志伟 林殿阳

(哈尔滨工业大学光电子研究所, 哈尔滨, 150001)

**摘要:** 综述了光学元件中受激布里渊散射(SBS)对光学元件的超声波损伤、对激光传输能量的损耗、对光束质量的破坏等问题的研究现状、进展;重点是大口径光学元件中横向受激布里渊散射,并指出其未来的发展前景。

**关键词:** 横向受激布里渊散射;光学元件损伤;强激光系统;光束质量

**中图分类号:** O437.2 **文献标识码:** A

### The research and development of the stimulated Brillouin scattering in the optical component

Ge Ziming, Lü Zhiwei, Lin Dianyang

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

**Abstract:** The present research situation and questions of the stimulated Brillouin scattering (SBS) in optical component are summarized in this paper. The ultrasonic wave damage, destroy of the beam quality, and the influence on the high power laser system including many big optical components are emphasized. And the further research direction on this field is pointed out.

**Key words:** transverse SBS; damage of the optical component; the high power laser system; beam quality

## 引 言

激光、特别是高强度激光,在当代许多高新技术领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>,是当今世界各国竞相研究的重要领域。随着强激光技术的不断发展,单元器件所承受的功率密度越来越高,强激光的传输必然伴随许多非线性效应;其中,大口径光学元件中的横向受激布里渊散射(transverse stimulated Brillouin scattering)就是其显著的效应之一<sup>[2~5]</sup>。横向受激布里渊散射能够造成光学元件性能下降、光束质量破坏、强激光能量的损耗,严重时可损坏光学元件进而对整个系统性能的有效发挥以及功率的进一步提高带来很大的限制。美国诺瓦激光系统的第5路口径为70cm的透镜的严重损伤就是最典型的一例<sup>[6]</sup>。

强激光是指具有大能量、高功率、短脉冲、高光束质量的激光,其功率一般大于 $10^{12}$ W、能量在 $10^3$ J

以上,聚焦功率密度甚至可高达 $10^{20}$ Wcm<sup>-2</sup>,能量高达几万焦耳。为了获得大功率高能量的激光,普遍的方法是采用扩大口径和增加路数,所以,强激光系统是一个十分复杂的激光工程系统,它包括激光振荡系统、前置放大系统、主放大系统、自适应光学系统、诊断系统等,整个系统有成千上万个光学元件<sup>[7,8]</sup>。

国内外对介质中受激布里渊散射已开展了大量的研究工作,研究的对象主要是气体和液体,研究的重点也主要集中在脉宽压缩、相位共轭、实时修复激光波面畸变、改善激光的光束质量等;而对光学元件中受激布里渊散射的研究相对较少,也很不成熟。光学元件中受激布里渊散射的研究对强激光系统的建造并确保高效而安全地运行具有巨大的应用前景。

## 1 光学元件中受激布里渊散射的研究状况

1964年,Chiao等首次在石英及蓝宝石中发现了受激布里渊散射,60年代末,Emmett和Schawlow在液体水、苯和四氯化硅中首次发现横向受激布里渊散射<sup>[9]</sup>。因受激布里渊散射的阈值特性,激光的强度越强,其效应越显著;特别是近年来

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金委和中国工程物理研究院联合基金资助项目。

作者简介:葛自明,男,1965年10月出生。讲师,博士后。现从事非线性光学与技术的研究工作。

收稿日期:2001-09-03;收到修改稿日期:2002-01-05

强激光技术在激光驱动惯性约束聚变研究的一系列新进展使得光学元件中强激光的受激布里渊散射引起光学元件的超声波损伤等问题越来越显著。目前,激光装置在获得高能量方面的主要限制不是在放大器的增益能力,而是在负载的限制上,即因光学元件、光学材料抗激光损伤的能力不足,影响光束质量的因素众多,使得输出能量和功率无法继续提高。

光学元件中受激布里渊散射的前瞻性研究工作主要是美国劳伦斯·里弗莫尔国家实验室以及为其服务的研究机构进行的<sup>[10,11]</sup>,研究的背景主要是针对惯性约束核聚变的大能量高功率的强激光驱动系统;其次是俄罗斯科学院激光研究所的研究工作<sup>[12,13]</sup>;中国科学院上海光学精密机械研究所对光学元件中受激布里渊散射也开展了相应的研究工作<sup>[14,15]</sup>。

### 1.1 各向同性玻璃元件中受激布里渊散射的研究

孟绍贤、於海武等建立了光学玻璃元件中一维纵向受激布里渊散射的物理模型并进行了数值求解<sup>[15]</sup>,提出了光学玻璃破坏的超声模型,应用诺曼斯基偏振光干涉仪测量了玻璃和掺钕玻璃的破坏阈值,取得了一些有益的结果。在强光场的作用下,玻璃将产生电致伸缩效应;在此过程中,布里渊散射和超声声场同时产生并相干放大。在超声波场的作用下,巨大的声压使光学玻璃破坏。同时,高频声子的强烈衰减将形成局部的加热也是破坏的可能因素,这种间接的热过程比光学玻璃直接吸收激光能量形成的热过程要显著得多,因为好的光学材料对光的吸收是很微弱的。由于光学元件的横向尺寸远比其厚度大,横向受激散射对应的增益长度相对较长,因此,一维模型忽略了横向受激布里渊散射的影响,不能全面反映光学元件中强激光的受激布里渊散射效应。

劳伦斯·里弗莫尔国家实验室的 Murray 等用脉冲 2.4ns、波长 350nm 的激光对大口径熔石英光学元件中横向受激布里渊散射进行了测量<sup>[5]</sup>,并对石英光学元件中瞬态布里渊散射、稳态布里渊散射、带宽的影响等进行了定性分析;Eggleston 等建立了大的光学玻璃中横向受激布里渊散射的物理模型<sup>[7]</sup>,类比一维纵向受激布里渊散射,并将其简化为一维模型,如图 1,给出了唯象的一维横向受激布里渊散射的数值解,计算了大口径光学玻璃中横向受激布里渊散射的强度及分布,模型的不足是忽略了后向增益的优先放大。

实际上,对于大口径的光学元件,既存在后向增

益放大的纵向受激布里渊散射,同时也存在对应横向较长增益长度的横向受激布里渊散射。光学元件中的泵浦光场、总的布里渊散射场和总的声场相互耦合。因此,有必要建立更全面的物理模型,进一步研究大口径光学元件中强激光受激布里渊散射对光学元件的损伤。

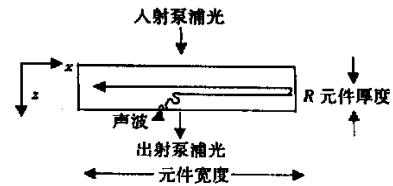


图1 光学元件中横向受激布里渊散射示意图  
R - 反射率

### 1.2 各向异性晶体元件中受激布里渊散射的研究

强激光系统中的大量光学元件,含有许多不同用途的晶体元件,如三倍频转换晶体磷酸二氢钾和靶场终端的光束变换元件、窗口材料等<sup>[16,17]</sup>。它们价格昂贵,光路中任何光学元件的破坏都将造成很大的损失,并最终限制了激光系统的性能,甚至是激光系统不能正常运行。由于晶体的各向异性十分复杂,对外界环境的作用又十分敏感,因此,确保其性能的发挥对合理设计和运行激光驱动器系统,获得安全稳定的高光束质量激光是至关重要的。Gregory 等用波长为 532nm 的氩离子激光对熔石英、GGG, KDP 等晶体样品的稳态和瞬态受激布里渊散射进行了实验测量,实验装置如图 2。泵浦光波长

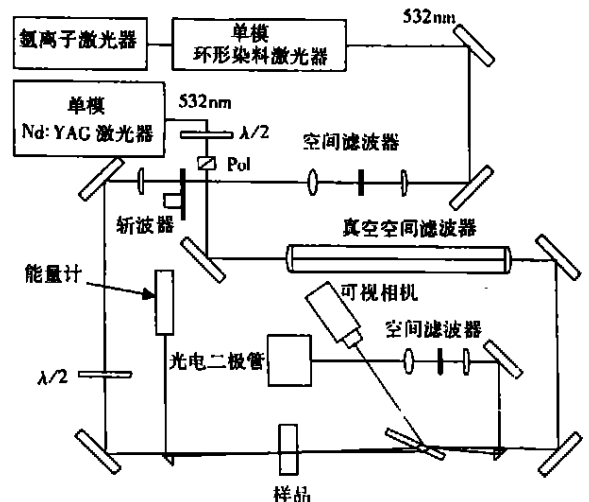


图2 波长为 532nm 的  $Ar^+$  激光测量熔石英、磷酸二氢钾等晶体样品中稳态和瞬态受激布里渊散射的实验装置

$\lambda/2$  - 半波片 Pol - 偏振片

为 532nm,连续单模染料激光为信号光,经过斩波器变换为脉冲激光。泵浦光和信号光都经过空间滤波器,两光束以 5mrad 的小夹角在样品中相干叠加,

驱动的超声波形成动态的相位光栅而产生受激布里渊散射。能量由能量计测量,空间波形由可视相机测量,时间波形由光电二极管测量。他们的工作给出了样品中布里渊的线宽、频移、增益、声速和弹性光学系数。俄罗斯联邦核子中心实验物理研究所的 Bel'kov 等对各向异性晶体中受激布里渊散射进行了探索性的理论研究<sup>[15]</sup>,从麦克斯韦方程和各向异性介质的连续性方程,推导出泵浦光在未被抽空的小增益时的耦合波方程。晶体的各向异性导致晶体元件中受激布里渊散射的研究比较困难,目前,人们对晶体元件中受激布里渊散射的机制极其引起晶体元件激光损伤方面还不十分清楚,有待于进一步的理论和实验研究。

### 1.3 光学元件中受激布里渊散射造成的危害

受激布里渊散射在光学晶体和光学元件中引起纵向尤其是横向声波,经边界反射后干涉将加强,特别是对光束的空间强度和位相产生微扰,会显著降低激光光束质量,光学元件中强激光受激布里渊散射导致折射率变化而产生的附加位相<sup>[18]</sup>:

$$= K \frac{4}{n_0 c} \frac{L}{n_2} I d L \quad (1)$$

式中,  $\phi$  为位相,  $K$  为激光波数,  $L$  为激光通过介质的长度,  $n_0$  为介质的折射率,  $n_2$  为非线性折射率,  $c$  为真空中的光速,  $I$  为光学元件中总的激光光强。由横向受激布里渊散射导致光强的横向截面非均匀分布,造成光束波面的严重畸变,致使光束小尺寸自聚焦,严重时必然造成光学晶体和光学元件的破损,甚至对光路中的光学元件造成毁灭性的破坏。光束质量的优劣对其物理应用的成败具有决定性的意义,它也是高功率激光技术中难度最大的课题之一。

发生受激布里渊散射时,入射光的能量转化为散射光的能量和声波的能量。当强激光入射时,入射光的较大部分能量被相干放大的散射光带走了,造成激光能量的严重损耗,这将大大降低激光能量的耦合效率,使激光器的“富功率贫能量”效应进一步加剧。光纤是一类十分重要的特殊光学元件,光纤中的受激布里渊散射不仅损失了光纤激光的能量,还可能造成比特误差和串话<sup>[8]</sup>。由于光纤具有长度很长的特点,光纤中产生受激布里渊散射的阈值一般较低,非常容易产生受激布里渊散射;强激光系统中大口径光学元件十分昂贵,其横向受激布里渊散射十分严重;因此,如何抑制光学元件中受激布里渊散射以利于进一步提高强激光系统的效率,已成为研究新一代高能激光器的一个关键问题。

笔者建立了光学玻璃中二维纵向瞬态受激布里渊散射的物理模型和计算方法,二维瞬态纵向受激布里渊散射的耦合波方程为:

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + \right) Q(r, z, t) = \frac{i q_a}{16 v_a} P(r, z, t) S^*(r, z, t) \quad (2)$$

$$\left( - \frac{i}{2 k_p} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{n_p}{c} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} + 2 \right) P(r, z, t) = \frac{i k_s}{2 n_p^2} Q(r, z, t) S(r, z, t) \quad (3)$$

$$\left( - \frac{i}{2 k_s} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{n_s}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} + 2 \right) S(r, z, t) = \frac{i k_s}{2 n_s^2} Q^*(r, z, t) P(r, z, t) \quad (4)$$

式中,  $n_p$   $n_s = n$  为玻璃元件中泵浦光、散射光的折射率,  $\epsilon$  为光场在玻璃介质中的电致伸缩系数,  $\Delta k$  为自发辐射 Brillouin (FWHM) 线宽。  $k_p, k_s, q_a$  分别为泵浦光、散射光及超声波的波矢,  $P(r, z, t)$ ,  $S(r, z, t)$ ,  $Q(r, z, t)$  分别为泵浦光、散射光及声波的复振幅。  $r, z, t$  分别表示光束空间横向径变量、纵向变量和时间。理论计算表明光轴对应的光学元件中心的超声波强度最大,且强激光受激布里渊散射产生的超声波的声压随元件的厚度增厚以及泵浦光强度的提高显著增长。对于光学玻璃元件,当泵浦能量功率密度在  $50\text{J}/\text{cm}^2 \sim 70\text{J}/\text{cm}^2$  脉宽  $\sim 1\text{ns}$  时,声压或张应力将达  $\sim 5 \times 10^7\text{N}/\text{m}^2$ ,有可能引起光学玻璃的超声波损伤。

## 2 未来光学元件中受激布里渊散射研究内容和主要发展方向

强激光系统中的光学元件的质量控制显然是一个涉及多种专业、多种技术、复杂的综合性质量工程,每个光学元件的质量不仅同基质材料以及加工质量有关,而且与激光系统的光束质量和多个元件的组合状态有关<sup>[19]</sup>,整个系统的光学质量控制和协调是一个系统工程问题。因此,了解各种光学元件中受激布里渊散射引起损伤的机理并掌握激光材料损伤的阈值对于优化设计和发挥激光系统的性能,对合理设计和运行激光驱动器系统,获得安全稳定的高光束质量激光,以开展惯性约束核聚变研究具有重要意义。

未来的主要发展方向和主要的研究内容如下。

(1) 光学玻璃元件中瞬态受激布里渊散射的研究。大口径光学元件中总的受激布里渊散射的理论

描述、产生横向瞬态受激布里渊散射的阈值、微观机理、横向受激布里渊散射的强度分布、材料边缘的反射以及横向和纵向受激布里渊散射引起光学元件的超声波损伤。

(2) 各向异性晶体元件中强激光受激布里渊散射的研究。石英、磷酸二氢钾等各向异性晶体中受激布里渊散射的理论研究及数值模拟;给出各向异性晶体中泵浦光场、散射光场和超声波场的耦合波方程以及晶体元件中产生受激布里渊散射的阈值;加深对高强度激光与各向异性晶体材料相互作用过程的规律性认识。

(3) 大口径光学元件中强激光横向光束质量的研究。大口径光学元件中强激光横向光束质量十分重要,其质量的好坏直接决定着整个装置的最终输出能力。强激光横向受激布里渊散射引起横向光强波动、光束波面畸变导致的自聚焦效应十分复杂又极具破坏性;受激布里渊散射的全量子理论研究也是十分必要的。

通过对强激光与玻璃和晶体等光学元件非线性相互作用规律的研究,丰富有关方面的知识,提出抑制和降低光学元件中受激布里渊散射的途径和措施。

(上接第 374 页)

焊接灵活性和精度

能够满足双面焊接  $\varnothing 105\text{mm} \sim \varnothing 500\text{mm}$  (厚 3.2mm) 的要求。

Table 2 The parameters of laser

No.	$I$ / A	$V$ / kV	$P$ / W	$P_{\max}$ / W	$P_{\min}$ / W	$P^+$ / %	$P^-$ / %
1	3.5	3.5	668.3	780	460	16.7	31.2
2	4.0	3.6	845.8	950	720	12.3	14.9
3	4.5	3.7	944.2	1010	870	7.0	7.9
4	5.0	3.8	1046.9	1080	990	3.2	5.4
5	5.5	3.9	1185	1200	1160	1.3	2.1
6	6.0	4.0	1372.5	1400	1340	2.0	2.4

### 3 主要焊接工艺分析

主要工艺参数

功率:一般在 2000W 以下。焊接速度:1500W 激光功率,刀基厚 (2.5 ~ 3.0) mm,刀头为 (3.0 ~ 3.8) mm 时,焊速约为 1.2m/min。偏移角度:由于刀头比刀基面厚 0.35mm 左右,为获得最佳角焊缝

### 参 考 文 献

- [1] 李锡善. 激光与光电子学进展, 2001(1): 1~4.
- [2] 陆建, 倪晓武, 贺安之. 激光技术, 1996, 20: 181.
- [3] 孙利国. 激光技术, 1991, 15: 298.
- [4] 辜建辉, 李再光, 陈殊殊. 激光杂志, 1992, 13: 57.
- [5] Murray J R, Smith J R, Ehrlich R B *et al.* J O S A, 1989, B6: 2402.
- [6] Heiman D, Hamilton D S, Hellwarth R W. Phys Rev, 1979, B19 (12): 6583.
- [7] Eggleston J M, Kusher M J. Opt Lett, 1987, 12: 410.
- [8] Faris G W, Leonard E J, Mark J D *et al.* Opt Lett, 1990, 15(12): 703.
- [9] Emmett J L, Schawlow A L. Phys Rev, 1968, 170: 358.
- [10] Smith J R, Murray J R, Ehrlich R B *et al.* SPIE, 1989, 1047: 219.
- [11] Hwa L G, Schroeder J, Zhao X S. J O S A, 1989, B6(4): 833.
- [12] Faris G W, Jusinsk L E, Hickman A P *et al.* J O S A, 1993, B10: 587.
- [13] Bel'kov S A, Bondarenko S V, Dolgoplov Y V *et al.* SPIE, 1996, 2771: 43.
- [14] Kyrakis D T, Weiland T L. SPIE, 1990, 1441: 469.
- [15] Yu H W, Meng S X. J. Appl Phys, 1997, 81: 85.
- [16] Kirby K W, Deshazer G. J O S A, 1987, B4(7): 1072.
- [17] Schroeder J, Hwa L G, Kendall G *et al.* J Non-Crystal Solids, 1988, 102: 240.
- [18] 余文炎, 郑玉霞, 谢梓铭 *et al.* 光学学报, 1985, 1(5): 19.
- [19] Baranova N B, Zel'dovich B Ya. Sov J Q E, 1980, 10(2): 172.

效果,入射激光倾斜  $4^\circ \sim 11^\circ$ 。离焦量:对于穿透焊采用负离焦量。焦点与被焊材料表面的距离约为板厚的 1/3。

焊接结果分析

(1) 焊缝强度

采用 24h 连续工作方式对锯片进行焊接强度检验,采用扭矩扳手。计算公式为:  $\tau = 6M/LE$ ,  $M$  为扭矩,  $L$  为刀头长度,  $E$  为基体厚度。经过对本公司产品的检验发现,激光焊接金刚石圆锯片的焊接强度达到了 MPA 标准<sup>[3]</sup>。

(2) 锯片焊接前后的跳动精度

锯片水平、垂直方向跳动精度在 0.02mm 以下。

### 4 结 论

(1) 高稳定性,焊接系统技术指标优良。(2) 可以焊接  $\varnothing 105\text{mm} \sim \varnothing 500\text{mm}$  锯片和  $\varnothing 68\text{mm}$ ,  $\varnothing 82\text{mm}$  钻头。(3) 焊接强度达到 MPA 标准。

### 参 考 文 献

- [1] Weber G. Industrial Diamond Review, 1991(3): 126~128.
- [2] Morin W. Industrial Diamond Review, 1988(5): 20~24.
- [3] 朱海红, 唐霞辉, 朱国富. 激光技术, 1988(5): 273~276.