

文章编号: 1001-3806(2005)02-0119-04

SBS相位共轭技术在强激光振荡系统上的应用

刘 莉¹, 吕志伟², 李正佳¹

(1. 华中科技大学 激光技术与工程研究院, 武汉 430074; 2 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 对 SBS相位共轭技术应用于强激光振荡系统 (master oscillator power amplifier, MOPA) 系统的研究工作进行了回顾, 介绍了几种用于放大级畸变修正、退偏补偿、激光束并束的典型实验方案, 指出了 SBS相位共轭技术应用于 MOPA 上的一些可能的发展方向。

关键词: 激光; 受激布里渊散射 (SBS); 相位共轭; 振荡系统 (MOPA)

中图分类号: O437. 2; TN248. 1 **文献标识码:** A

Application of SBS phase conjugation technique in high power laser MOPA system

LIU Li¹, LÜ Zhiwei², LI Zheng-jia¹

(1. Institute of Laser Technology & Engineering, HUST, Wuhan 430074, China; 2 National Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A review about application of SBS phase conjugation technique in laser MOPA system is given. Several typical experimental schemes for aberration correction, depolarization compensation, laser beam combination are introduced and possible future research directions are indicated.

Key words: laser; stimulated Brillouin scattering (SBS); phase conjugation; master oscillator power amplifier (MOPA)

引 言

在近 30 年中, 非线性光学相位共轭技术已成为科学技术研究和发展的最活跃的领域之一。随着人们从理论和实验上深入的研究, 非线性光学相位共轭技术展现出在自适应光学、高能量高亮度激光系统以及光学信息处理、图像传输、运动检测、滤波和超低噪声通讯等许多领域具有十分广泛的应用潜力^[1]。受激布里渊散射 (SBS) 相位共轭技术是获得相位共轭光的重要手段, 与其它非线性光学相位共轭技术相比, SBS 相位共轭镜 (PCM) 具有结构简单、自抽运的特点, 以及实时产生相位共轭波、比较理想地修正任意波前畸变的独特能力, 所以, 自从 ZEL'DOVICH 报道用 SBS 消除激光束波前畸变以来, 利用 SBS 实现光学相位共轭已成为人们在非线性光学相位共轭领域重要的研究对象, 正在被研究用于发展高功率激光系统尤其是聚变装置, 以及激光系统级间去耦、激光脉冲压缩、放大级畸变修正、退偏补偿、激光束并束等许多方面。

作者简介: 刘 莉 (1972-), 女, 博士, 主要从事非线性光学、激光光谱学、激光生物医学方面的研究工作。

E-mail: li_liu2002@sina.com.cn

收稿日期: 2004-04-05; 收到修改稿日期: 2004-06-07

1 SBS相位共轭技术

受激布里渊散射最早是在 1964 年发现的, 而受激布里渊散射相位共轭技术是在 70 年代发展起来的。关于 SBS 相位共轭的最初报道显示, 激光束的畸变可以由 SBS 池反射回来的光束再次通过畸变源而被消除。SBS 相位共轭技术的概念可以定性描述^[2]如下: 考虑一个畸变光波聚焦到 SBS 相互作用区中。由于光波是高度畸变的, 则在光束聚焦区产生一个高度非均匀的强度分布 (即体斑纹图样, 如图 1 所示)。

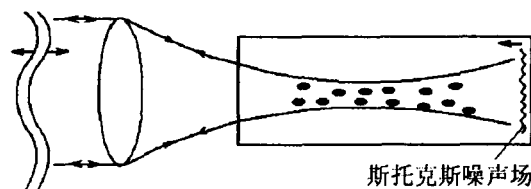


图 1 SBS 相位共轭的起源

Stokes 波增益取决于激光强度的局部值, 在聚焦区将出现 Stokes 波增益的不均匀分布。SBS 起源于噪声, 导致 SBS 过程的噪声场初始时包括各种可能的空间傅里叶分量。然而, 噪声场经历最大放大的部分, 是其强度与非均匀增益分布最匹配的那部分。这部分噪声场的波前必定与入射激光场最为匹配, 因此, 对应于入射激光场的相位共轭。

2 SBS相位共轭技术在激光器 MOPA 系统上的应用

对于高功率固体激光器的许多应用来说,光束亮度是一个重要的因素。例如在物质加工(钻孔、切割、焊接等)及医学中需要高质量的激光束来聚焦或耦合到光纤之中。输出平均功率为几十瓦的商业激光器,其光束质量一般较差,约为5倍衍射极限。这是因为固体激光器中闪光灯10%的能量转化为激光棒的热能,而激光棒的表面冷却使其产生温度梯度,激光介质的热分布不均匀引起激光光束波前畸变,而且由于热应力产生显著的双折射,这种双折射导致激光辐射严重退偏。

2.1 波前畸变修正

光学相位共轭法可以补偿固体激光器的相位畸变。气体或液体中的受激布里渊散射可以用来实现最简单的光学相位共轭,这是实现双程或多程放大的简便、自抽运装置。在ZEL'DOVICH报道用SBS相位共轭特性对畸变补偿后不到1年时间内,这种双程相位共轭装置便被用于补偿红宝石放大级上的相位畸变^[3],而且给出一种用激光振荡级、放大级结构获得近衍射限的方法:当两次通过放大级时,脉冲能量增大,利用相位共轭可以成功地保持谐振腔光束质量。用这种方法,放大级出射的光束发散角由2.5mrad减为0.15mrad。从那时起,大量文章报道用共轭的MOPA来改善固体激光器性能,一些工作是关于红宝石激光器的,而大部分工作却是在使用钕物质的激光器上,包括Nd glass, Nd YAG, Cr Nd GSGG。构造相位共轭MOPA上所面临的几个挑战,可能就是非线性介质、共轭结构的选择及光束的耦合输入输出方式。(1)非线性介质的选择:大多数获得较好结果的实验,或者使用高压气体或者使用液体,仅有几个使用固体的特例。气体不存在腐蚀、气泡、悬浮颗粒等缺陷,而液体一般具有较低的SBS阈值及短声子寿命。然而不论用何种介质,都应注意当抽运激光脉冲宽度 $T \leq \tau_B$ 时,SBS过程的瞬态特性都会将有效增益降低5~10倍。(2)共轭结构的选择:选择SBS结构主要是从共轭保真度的特性来考虑的。人们普遍认为,波导或“光管”中的共轭保真度优于纯聚焦结构,这一观点为ZEL'DOVICH的实验及分析证实。但“纯聚焦装置的简单性对实验家具有极大的吸引力”,因此,纯聚焦结构使用非常广泛。关于这两种结构有一些实用问题需要注意。波导结构中,透过率的损失可能会降低共轭的效率,而且多次从波导壁上的反射将会导致退偏;对于聚焦结构,如果光束近场分布包含高频部分,聚焦结构的共轭保真度也将会被损失。CARR^[4]在他们的实

验中采用了简单而实用的方法。使用聚焦结构及甲烷(压力 3×10^6 Pa),获得了极好的结果:从重复频率15Hz,75mm长的Nd YAG放大级,得到300mJ近衍射限输出。有人也采用聚焦甲烷共轭镜从二级800mJ,10Hz Nd YAG MOPA获得了近衍射限输出。我国的许多研究小组也做了大量的工作。安光所的周卫东等^[5]采用聚焦的正己烷共轭镜,将XeCl激光束散角减小到1/3。哈尔滨工业大学的于欣等^[6]利用CCl₄作为SBS介质,修正Nd YAG激光波前畸变,获得脉冲能量260mJ,发散角1.17mrad,重复频率10Hz的稳定输出。(3)光束耦合输出方式:MOPA上光束的耦合输入输出方法中,最简单的方法就是在放大级/PCM光路上插入光学元件,光束二次通过该元件后,偏振方向转过90°,用普通的偏振片就可以将入射光束与垂直偏振的放大级输出光束分开。偏振偏转元件可以是法拉第旋转器,1/4波片,或非涅耳棱体。然而,如果放大级出现热双折射,那么这种简单方案将使输出光束的退偏部分馈入谐振腔,降低输出效率甚至损坏谐振腔中光学元件。即使不出现退偏,由于偏振片偏振的不完全,仍存在同样的光学隔离问题。而且安装在大口径光束上的大尺寸偏振片的价格质量等原因,限制了激光能量的放大。这个问题可以用MOYER提出的一种方案避免^[7]:偏振方向互相垂直的输入输出光束,由放在共轭镜附近的双折射楔角度分离。这种方案的缺点是如果角度分离大于放大级畸变的横向尺寸,共轭保真度将会下降。可以通过将角度分离降到几分之一毫弧度来减小这个问题。另一种输入输出耦合方法^[8],仅需要将谐振腔光束从未镀膜的玻璃片或玻璃楔反射向放大级。然而这种方法对谐振腔能量利用率很低,而且对于退偏效应非常不敏感。最近,在紧凑单池系统SBS脉冲压缩实验中^[9],又提出了一种新的方法解决光学隔离问题。利用布里渊频移,将F-P标准具代替偏振片,以特定的角度放置在光路中,使抽运光全部透射,而反射Stokes光。在原理上,这种方案的光学损耗很低,适用于高反射率的脉冲压缩。而且这种方案的另一个优点是利用了布里渊频移而不是光束的偏振方向进行光学隔离,故不存在退偏的影响,但是该方案对F-P标准具的抗光学损伤能力要求很高。

在以前的相位共轭MOPA中,常采用双程放大结构,如果系统的整个损耗很低,可以通过增加光程数,提高放大级的能量提取率。这种思想在低增益介质例如Nd glass中非常吸引人。目前,4程放大^[4]、8程放大^[10]的方案中已经采用,22程放大的方案也被提出。DANE^[10]使用一个Nd YAG放大级板(slab),采用8程放大对其进行能量提取,得到重复频率6Hz,平均功率150W,脉冲能量25J~30J,近衍射限光束质量的极

好结果。前苏联 ALEKSEEV^[8]用多路钨玻璃放大级, 获得到目前为止最大输出能量 405J, 小信号增益 10^4 cm^{-1} 。

2.2 退偏补偿

在固体激光器功率放大中的另一难题就是热感应双折射, 即激光束退偏。ZEL'DOVICH 等最先对抽运波均匀偏振和不均匀偏振对相位共轭保真度的影响进行了严密的理论研究。他们发现只有整个抽运光偏振态为均匀时 (均匀偏振是指偏振态为线偏振、圆偏振、椭圆偏振时与抽运光束的横向位置无关), 才能得到波前反演, 而且反射光的偏振态与抽运光一致。分析显示, 在不均匀偏振下, 后向散射波的较强分量是抽运波中较强分量的反演, 与抽运弱分量无关, 结果是散射波相对于抽运波偏振程度增强, 抽运波偏振态既没有被反演也没有被再现。基于上述理论, SBS 相位共轭不能自动地补偿放大级热感应双折射。人们采用了很多方法来解决退偏问题。一种就是使用特殊的放大级抽运结构, 或采用特定的放大级激光物质。DANE^[10]用二极管抽运的 Nd:YAG 放大级板与 SBS PCM 一起解决退偏问题, 然而由于二极管抽运及放大级板的价格与设计方面的因素, 使人们不得不再考虑其它方法。CARR, ECHLER 等^[4, 11]使用天然双折射 Nd:YAD₃ 作为激光物质, 其没有热双折射效应, 但由于这种大口径高光束质量的激光棒很难生长, 因此这种方法也没有被广泛采用。另外几种退偏补偿的方法是比较常用的 SBS 相位共轭方法。第 1 种方法是由 SCOTT 等提出。他在两个完全相同的激光棒之间加入 90° 偏振旋转器来消除双折射效应。其基本思想是这两个激光棒是完全等同的, 其中一个棒产生的双折射可以由另一个激光棒来消除。利用这种方法确实获得了很好的结果。然而由于激光棒受热不均匀及缺陷等, 导致两棒热退偏非对称性和其它影响两棒等同性的因素, 限制了这种方法的应用。LUE 等提出了这种方案的改进措施 (见图 2a)。在两个等同的放大级之间除加入一个偏振旋转器外, 还加入一个光学成像传递系统 (即放大级之间的两个透镜 L_1, L_2)。由于在两个放大级之间一对一的成像传递, 这种方案对两个放大级的任意热

载都有效。只要两个放大级工作在同一抽运功率, 就可以获得最佳的退偏补偿。SEDEL^[12]用这种方案在 Nd:YAG 振荡级放大级系统退偏补偿, 获得了平均功率 215W、光束参数乘积 (beam parameter product) 小于 $1 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 的结果。我国华北光电所的刘朗等人^[13]和工程物理研究院的丁磊等人^[14]在 Nd:YAG 激光系统中采用同样的退偏补偿方案, 分别获得了脉冲能量 450mJ, 1.3 倍衍射极限、重复频率 40Hz、能量稳定性 3.5% 和脉冲能量 1.1J, 1.4 倍衍射极限、重复频率 10Hz 的高质量强激光输出。CARR 提出了另一种改进方案^[4] (见图 2b)。这种方案的特点是利用 PCM, 使光束二次通过放大级和法拉第旋转器, 使其偏振方向转过 90° 。SCOTT 的方案中两个激光棒是完全等同的, 因为事实上它们就是同一个激光棒。CARR 用这种方法将 Nd:YAG 放大级的剩余退偏减少到 5% 以内。这种方案在退偏补偿能力上有两个限制: 一是入射到 SBS 池内的偏振态必须接近均匀, 以使其在后向散射波中能被精确再现; 二是仅当双聚焦效应小时这种补偿才是合适的, 否则因为输入与输出偏振正交, 二次通过的光束将不按原路返回。从上述观点看, 只有当二次通过放大级时偏振态相同, 而且在 SBS 池中偏振为线性均匀时, 才能获得最好的退偏补偿。BASOV 提出的一个实验方案满足了这种要求 (见图 2c)。线偏振光通过放大级后被畸变和退偏, 一个双折射楔将激光束分成偏振态互相垂直的两束光, 其中一束光的偏振态随后被旋转 90° , 两光束在畸变相位板上被调制, 并被聚焦到同一 SBS 池中。注意由于入射到 SBS 池的光束为均匀线偏振, 二次返回的光束偏振态等同于第一次入射时的偏振态。BASOV 用这种方法将完全退偏的光束补偿为偏振特性大于 90% 的光束。随后又有许多人采用了 BASOV 的方案。这种方案的主要缺点是必须引入相位板, 以使光束在布里渊池中混合。这增大了 SBS 阈值, 而且相位板引入不均匀斑点噪声, 增大了光束截面中局部的辐射强度, 引起光学击穿。ANDEEV^[15]提出了一种被称为“垂直相位共轭”的退偏补偿新方案 (见图 2d)。退偏的入射光束经偏振片分成偏振态互相垂直的两束光, 经过一个光学

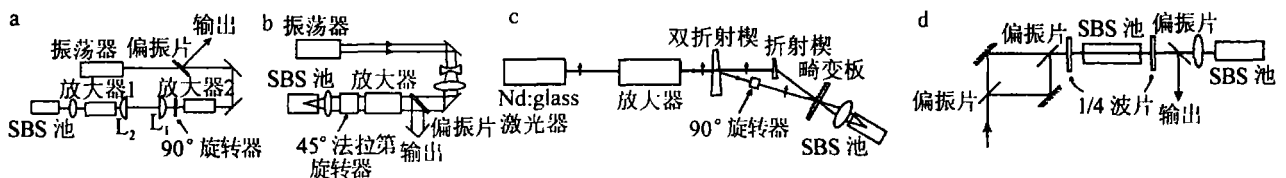


图 2 几种用于退偏补偿的 SBS 结构

延迟系统进入 SBS 双池。在第 1 个 SBS 池的两端加两个 $1/4$ 波片, 在第 2 个 SBS 池前再加一个偏振片, 因此只有一种偏振态的光能通过偏振片进入第 2 个 SBS

池。这种偏振态的光被第 2 个 SBS 池反射, 后向传播回第 1 个池。此时其偏振方向已转过 90° , 与输入光束的另一个分量相互作用。关于这种方案详细的理论

解释已在文献 [15] 中给出。在重复频率 $5\text{Hz} \sim 25\text{Hz}$ 的情况下, ANDREEV 将 Nd:YAG 放大级的退偏由 $25\% \sim 30\%$ 减少到 5% 以内, 而且输出脉冲能量高达 1.7J , 束散角为 1.5 倍衍射极限^[16]。

2.3 激光束并束

当解决增加激光器平均功率的问题时, 在更高的强度下, 激活元件将出现光学击穿, 必须放弃顺序放置激活元件的方案。通常, 正如以前的工作所示^[17], 可能的方案就是激光系统由一个低能主激光器和几个平行放置的放大级组成。主激光器的光束被分成几个子光束, 每个这样的子光束在一次通过放大级后被放大, 经相位共轭和相位锁定元件反射后, 子光束按原光路返回, 合并成一个高能近衍射限的激光束。已经有采用各种技术利用 SBS 获得相位锁定共轭镜的报道^[18]。而且也有许多小组研究了光束并束时, 各光束重叠程度对相位锁定的影响。VASL'EV 在用四氯化碳 SBS PCM 做双光束并束时, 发现两光束夹角在高达 20mrad 时, 仍可获得相位锁定, 尽管随着夹角的增大, 相位锁定所需能量线性增加, 在 $\theta = 20\text{mrad}$ 时, 达到了 100 倍阈值。ANDREEV 的退偏补偿方案也被用于双光束并束, 他在 25Hz Nd:YAG 激光器上进行双光束并束, 得到脉冲能量大于 5J 的近衍射限输出^[19]。另一种解决的方案就是用光纤 SBS 相位共轭镜代替传统的 SBS 池^[20~23]。由于光纤内高光强的长作用长度, 光纤 SBS 相位共轭镜效率很高, 能量反射率一般在 80% 以上^[22, 23]。SBS 阈值取决于光纤芯径, 选择合适芯径的光纤, 可以将 SBS 阈值控制在要求的范围内。图 3 为

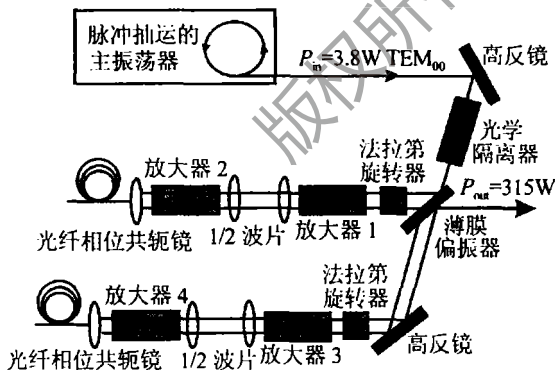


图 3 REISBECK 用于激光束并束的实验装置

REISBECK^[21] 实验中所用的带有光纤 SBS 相位共轭镜的 MOPA 系统。这种脉冲 MOPA 系统以 Nd:YAP 作为激活元件。Nd:YAP 在效率上与 Nd:YAG 相当, 但它具有很强的自然双折射, 即使在很强的光学抽运下, 也不会出现退偏, 因此激光束在通过放大级系统后, 仍会保持偏振状态。主振荡器通过光学隔离器, 在薄膜偏振器上被分成偏振态互相垂直的两束光, 进入两个平行放置的放大器链。经过法拉第旋转器, 每束光的偏振面都被转过 45° , 并被顺序放置的两个放大器放大。

为了补偿热透镜造成的像散, 第 2 个放大器要旋转 90° , 偏振用一个半波片来匹配。单程通过 2 个放大器后, 光束被耦合到光纤相位共轭器中。当再次通过 2 个放大器后, 原始的光束质量几乎得到再现, 第 2 次通过法拉第旋转器后, 光束的偏振面将再次转过 45° 。二次通过法拉第旋转器的结果, 使得每一个光束的偏振面都转过 90° , 因此能够在 TFP 上得到激光输出。由于相位共轭的光学特性, 这两束光自动重叠在一起。用这种双程放大系统, REISBECK 获得了平均功率 315W 、光束传输因子 $M^2 < 2.6$ 、重复频率 2kHz 的强激光输出。目前, 他们正在建立输出功率高达 500W 的激光 MOPA 系统。

3 结论

介绍了 SBS 相位共轭技术在强激光振荡系统上的应用。利用 SBS 的相位共轭特性, 可以补偿激光器的相位畸变, 获得高光束质量、高亮度的激光束。现在的激光系统正朝着小型化、高稳定性、高重复频率、高亮度、高光束质量的方向发展, 这对于带有 SBS PCM 的强激光 MOPA 系统提出了更高的要求, 在高重复频率工作下, 现有的大多数 SBS 介质由于负载能力的限制而导致能量反射率和共轭保真度下降, 稳定性也变得很差。寻找新型 SBS 介质及新型 SBS 相位共轭镜将是一个重要的研究方向。另外, 光纤 SBS 相位共轭镜具有体积小、低 SBS 阈值、高反射率、高稳定性、高破坏阈值、输出光束质量好等特点, 所以自从 1996 年问世以来, 受到人们的广泛重视, 这种带有光纤 SBS 相位共轭镜的激光 MOPA 系统也必将是高功率激光器的一个重要发展方向。

参考文献

- [1] PEPPER D M. Introduction to the special issue on nonlinear optical phase conjugation [J]. IEEE J Q E, 1989, 25 (3): 312.
- [2] BOYD R W. Nonlinear optics [M]. Amsterdam, Boston: Academic Press, 1992. 345, 337, 349.
- [3] EICHLER H J, HAASE A, MENZEL R. 100-Watt average output power 1.2 diffraction limited beam from pulsed neodymium single-rod amplifier with SBS phase conjugation [J]. IEEE J Q E, 1995, 31 (7): 1265~1269.
- [4] CARR ID, HANNA D C. Performance of a Nd:YAG oscillator/amplifier with phase-conjugation via stimulated scattering [J]. Appl Phys, 1985, B36: 83~92.
- [5] 周卫东, 余吟山, 洪玲 *et al* 受激布里渊散射相位共轭镜产生高质量短脉冲 XeCl 激光 [J]. 光学学报, 1998, 18 (7): 845~850.
- [6] 于欣, 鞠有伦, 王月珠 *et al* 利用受激布里渊散射提高固体激光系统光束质量的实验研究 [J]. 中国激光, 2001, 28 (8): 685~688.
- [7] ROCKWELL D A. A review of phase-conjugate solid-state lasers [J]. IEEE J Q E, 1988, QE24 (6): 1124~1140.

(下转第 152 页)

按上节原理搜索峰值波长了。

为测试系统性能,选用光纤光栅(1552.3nm)粘贴于由复合材料制成的等强度梁上,靠微位移器对其施加拉应变,应变量由自制应变仪读取。图4是测量数据与系统读出所作的对比图,经过最小二乘直线拟合,得到系统测量灵敏度为 $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}/\mu\epsilon$,线性度为 0.9921 。

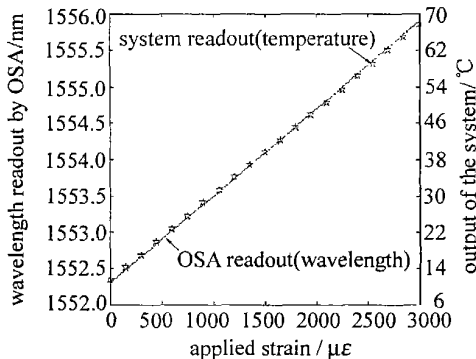


Fig 4 Readout contrast between OSA and the system

分别按照(3)式和波长校准(4)式,利用程序推算出传感光栅的波长,作为系统的测量值,通过光谱仪测得传感光栅的波长作为实验真值。在测量数据多于20点的情况下,结果显示,未采用校准时系统读出值的误差均在 0.04nm 以内,实时校准后波长测试的误差均在 0.017nm 以内。认为采用多个离散的参考波长可进一步减小误差。

实验中采用高精度变送器电路使Pt100a的温度读取分辨率达到 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,于是系统可读取的最小波长

变化量由(3)式可得: $\delta\lambda_{\min} \approx 0.061 \times \delta T \approx 0.061 \times 0.05 \approx 0.0031\text{nm}$ 。根据传感光栅的应变响应关系式 $\delta\lambda/\lambda_0 = 0.78\delta\epsilon$ 可知,应变测量分辨率约为 $2.56\mu\epsilon$ 。

3 结论

报道了一种采用新型复用调谐结构的光纤光栅传感器波长检测方案。实验系统对电热调谐的光纤光栅滤波器进行复用,同时采用参考技术对波长读取进行实时校准,消除了电热调谐过程中的蠕变误差,提高了检测的准确性。该系统结构简单、成本低,有望应用于油气井下或输油管线上压强、温度的在线监测。

参考文献

(上接第122页)

- [1] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J *et al* Fiber grating sensors [J]. *J Lightwave Technol*, 1997, 15(8): 1442~1463.
- [2] 鲍吉龙,章献民,陈抗生, *et al* 光纤光栅传感器及其应用 [J]. *激光技术*, 2000, 24(3): 174~179.
- [3] KERSEY A D, BERKOFF T A, MORIE W W. Multiplexed Bragg grating fiber-laser strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter [J]. *Opt Lett*, 1993, 18(16): 1370~1372.
- [4] LISSAK B, ARIE A. Highly sensitive strain measurements by locking lasers to fiber Bragg gratings [J]. *Opt Lett*, 1998, 23(24): 1930~1932.
- [5] HU Y, CHEN S, ZHANG L *et al* Multiplexing Bragg grating using combined wavelength and spatial division technique with digital resolution enhancement [J]. *Electron Lett*, 1997, 33(23): 1973~1975.
- [6] KERSEY A D, BERKOFF T A, MORIE W W. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. *Electron Lett*, 1992, 28(3): 236~238.
- [7] 谢芳,张书练,李岩 *et al* 光纤光栅反射波长移动研究 [J]. *激光技术*, 2002, 26(2): 84~85.
- [8] ALEKSEEV V N, GOLUBEV V V, DMITRIEV D I *et al* Investigation of wavefront reversal in a phosphate glass laser with a 12cm output aperture [J]. *Soviet J Q E*, 1987, 17(4): 455~458.
- [9] VESHEV D, VELCHEV I, MAJEWSKI W A *et al* SBS pulse compression to 200ps in a compact single-cell setup [J]. *Appl Phys*, 1999, B68: 671~675.
- [10] DANE C B, ZAPATA L E, NEUMAN W A *et al* Design and operation of a 150W near diffraction-limited laser amplifier with SBS wavefront correction [J]. *IEEE J Q E*, 1995, 31(1): 148~163.
- [11] EICHLER H J, HAASE A, MEHL O. Serial arrangement for high power solid-state amplifiers with phase conjugating mirror [J]. *SPIE*, 1996, 2788: 148~156.
- [12] SEDEL S, KUCLER N. Nd:YAG 200W average-power oscillator-amplifier system with stimulated-brillouin-scattering phase conjugation and depolarization compensation [J]. *J O S A*, 1997, B14(7): 1885~1888.
- [13] 刘朗,秘国江,黄茂全 *et al* 高重复频率大能量单纵模激光器 [J]. *中国激光*, 2003, 30(10): 886~889.
- [14] 丁磊,隋展,张小民 *et al* 高光束质量 Nd:YAG激光系统的研制 [J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(s1): 197~200.
- [15] ANDREEV N F, KHAZANOV E A, KUZNETSOV S V *et al* Locked-phase conjugation of two beams of pulse-repetition-rate solid-state laser [J]. *IEEE J Q E*, 1991, 27(1): 135~142.
- [16] ANDREEV N F, KHAZANOV E A, PASMANIK G A. Applications of Brillouin cells to high repetition rate solid-state lasers [J]. *IEEE J Q E*, 1992, 28(1): 330~341.
- [17] SUMDAS, JONES D C, ROCKWELL D A. An 8.2J phase conjugate solid-state laser coherently combining eight parallel amplifiers [J]. *IEEE J Q E*, 1994, 30: 2617~2627.
- [18] RIDDLEY K. Phase-locked phase conjugation by Brillouin-induced four-wave mixing [J]. *J O S A*, 1995, B12: 1924~1932.
- [19] ANDREEV N F, KHAZANOV E A, KULAGIN O V *et al* A two-channel repetitively pulsed Nd:YAG laser operating at 25Hz with diffraction-limited beam quality [J]. *IEEE J Q E*, 1999, 35(1): 110~114.
- [20] RISSE E, MEHL O, RIESBECK T *et al* Continuously pumped all-solid-state laser systems with fiber phase conjugate mirror [J]. *SPIE*, 2001, 4184: 179~182.
- [21] RIESBECK T, RISSE E, EICHLER H J *et al* Pulsed solid-state laser system with fiber phase conjugation and 315W average output power [J]. *Appl Phys*, 2001, B73(8): 847~849.
- [22] EICHLER H J, MEHL O, RIESBECK T *et al* High-brightness laser systems with fiber phase conjugation [J]. *CLEO*, 2000, B7: 177.
- [23] RIESBECK T, RISSE E, EICHLER H J *et al* Pulsed solid-state laser systems with high brightness by fiber phase conjugation [J]. *SPIE*, 2002, 5131: 59~64.