

# 带SBS相位共轭镜的高重复频率高功率激光系统研究进展

王昊成<sup>1,2</sup> 樊仲维<sup>1</sup> 余锦<sup>1</sup> 康治军<sup>1,2</sup> 葛文琦<sup>1</sup> 郭广妍<sup>1,2</sup> 王治昊<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100094

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 受激布里渊散射(SBS)是一种三阶非线性光学效应,SBS相位共轭镜(PCM)是基于SBS的自抽运PCM,能实时补偿放大器和放大光路中的波前畸变,改善激光器的输出光束质量,其应用越来越广泛。简要介绍了SBS-PCM激光系统的基本原理和典型装置,并概述了国内外液体和固体SBS相位共轭技术在高重复频率高功率激光系统中的研究进展,提出带SBS-PCM的高重复频率高功率激光系统有待解决的问题。

**关键词** 激光器;受激布里渊散射;高重复频率;高功率激光;相位共轭镜;SBS介质

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.040001

## Research Progress of High Repetition Rate and High Power Laser with SBS-Phase Conjugate Mirror

Wang Haocheng<sup>1,2</sup> Fan Zhongwei<sup>1</sup> Yu Jin<sup>1</sup> Kang Zhijun<sup>1,2</sup> Ge Wenqi<sup>1</sup>  
Guo Guangyan<sup>1,2</sup> Wang Zhihao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Stimulated Brillouin scattering (SBS) is a third-order nonlinear optical effect. Stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirror (PCM) is a self pumped PCM based on SBS. SBS-PCM can compensate wavefront distortion caused by system thermal aberration and material inhomogeneity and improve laser beam quality. The applications of SBS-PCM are becoming more and more extensive. We review the typical laser configuration with SBS-PCM. Research progress in this field at home and abroad is briefly summarized. Some problems to be resolved are also put forward.

**Key words** lasers; stimulated Brillouin scattering; high repetition rate; high power laser; phase conjugate mirror; stimulated Brillouin scattering media

**OCIS codes** 140.3535; 140.3580; 140.6810; 220.1000; 220.1010

## 1 引言

高亮度、高重复频率固体激光器在高精度材料加工、离子体诊断、X射线产生<sup>[1]</sup>等方面有着广泛的应用。激光亮度反比于光束质量因子( $M^2$ )的平方,正比于平均输出功率<sup>[2]</sup>,因此,人们希望在获得高平均功率的同时,获得高光束质量的激光。激光晶体的热透镜效应和热致双折射效应<sup>[3-4]</sup>等导致固体激光器的光束质量随着抽运功率的增加而急剧下降。为了降低热负载,人们采用二极管抽运激光晶体以减少热沉积。另外,采用先进的晶体结构(如薄片<sup>[5]</sup>、板条<sup>[6]</sup>)增加增益介质散热效率,以有效减少激光光束相位畸变。但是对于高

收稿日期: 2013-10-11;收到修改稿日期: 2013-12-04;网络出版日期: 2014-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(61205136)、中国科学院光电研究院创新项目(Y30B16A13Y)

作者简介: 王昊成(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光技术及非线性光学方面的研究。

E-mail: wanghaocheng@aoe.ac.cn

导师简介: 樊仲维(1965—),男,研究员,主要从事衍射光学理论与器件、光学仪器设计与研制等方面的研究。

E-mail: fanzw002@163.com(通信联系人)

重复频率、高功率激光光源来说,即使采用二极管抽运技术、先进的晶体结构和高效的热管理技术,激光系统仍有严重的热沉积与残留的波前畸变,从而导致激光的光束质量远大于衍射极限。在这种情况下,采用相应的技术补偿相位畸变是改善激光光束质量的有效技术途径。

自从1972年苏联的Zel'dovich等<sup>[7]</sup>首次开展了受激布里渊散射(SBS)实验,证明SBS相位共轭技术具有改善激光光束质量的重要特性以来,各国科研人员进行了大量的实验和理论研究<sup>[8-12]</sup>,其工作大多都集中于低重复频率(1~10 Hz)<sup>[13-15]</sup>主振荡功率放大(MOPA)系统的SBS相位共轭镜(PCM)技术。高重复频率激光脉冲入射下,对SBS-PCM有不利的影响,因此在一定程度上限制了SBS-PCM在高重复频率激光器中的应用。本文简要介绍SBS-PCM激光系统的基本原理和典型装置,并概述液体和固体SBS相位共轭技术在高重复频率高功率激光系统中的研究进展,最后提出带SBS-PCM的高重复频率高功率激光系统有待解决的问题。

## 2 SBS-PCM激光系统的原理及典型装置

### 2.1 SBS-PCM原理

光学相位共轭技术因其能够实时地产生相位共轭波、修正任意波前畸变而得到了广泛的研究。产生相位共轭波的方法有三波混频、四波混频和SBS等,SBS过程中只需要一束光,且入射光本身可充当抽运光,结构简单,所以利用SBS实现相位共轭波已经成为相位共轭领域重要的研究内容。对于SBS产生相位共轭波的物理过程,可以用以下物理模型解释<sup>[16]</sup>:当SBS介质内激光(充当入射信号光)强度超过SBS阈值时,将在SBS池中产生与激光同向传输的声波,此声波可视为一个不断向前移动的“反射镜”,入射激光在“反射镜”作用下将产生一个有多普勒频移的背向散射光(波长略有变大),在布里渊增益最大的条件下,入射到介质的畸变波前产生有相同畸变的声波波前,因此这一“反射镜”可视为形变了了的反射镜,其表面刚好使得散射光波前与入射光波前相同,所以散射光为入射信号光的相位共轭光,用于修正腔内温度和增益介质不均匀等导致的波前畸变。该物理过程的形象说明如图1所示。

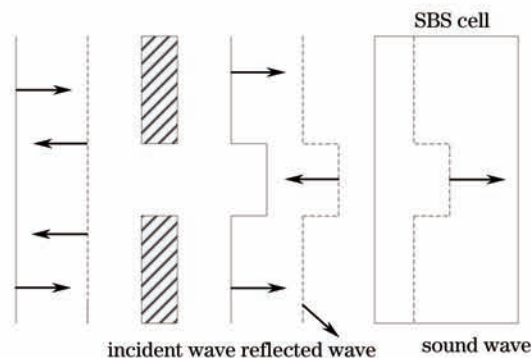


图1 SBS修正波前畸变的物理模型

Fig.1 Physical model of wavefront distortion revision by SBS

### 2.2 带SBS-PCM的激光系统典型装置

目前大多数激光器采用MOPA结构获得高亮度、高功率输出,虽然振荡级可以输出高光束质量的种子源,但由于高功率激光放大介质是被强光抽运的,大部分光还是会以热的形式沉积下来,从而使系统输出的光束质量下降。为了从根本上解决放大器引起的相位畸变,常常采用带SBS-PCM的激光系统,从而获得高光束质量近衍射极限的高功率激光输出。

带SBS-PCM的激光系统典型装置如图2所示。为了使SBS-PCM具有高的反射率和相位共轭保真度,大多数系统都采用高稳定性、高光束质量单纵模激光器作为系统的种子源。种子源输出的光经过薄膜偏振片(TFP)检偏为p偏振,经过激光放大器(AMP)后,光束产生相位畸变,畸变后的光束聚焦进入SBS-PCM产生相位共轭波,相位共轭波再次经过放大器后,畸变波前就会得到有效补偿,这样从种子源输出的衍射极限激光在经过放大器后仍能保持衍射极限输出。种子源两次经过1/4波片(QWP)后,偏振方向旋转90°,p偏振变成s偏振,被偏振片耦合输出。1972年,Nosach等<sup>[17]</sup>首次在激光系统中使用此装置,使输出光束的发散角

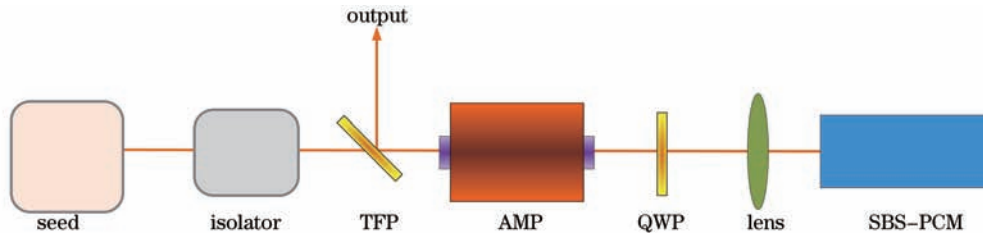


图2 带SBS-PCM的激光系统典型装置

Fig.2 Typical setup of laser with SBS-PCM

从2.5 mrad降为0.15 mrad。

### 3 国内外研究进展综述

利用SBS相位共轭技术对光波波前畸变进行实时校正,从根本上提供了解决脉冲激光器输出功率和光束质量这一对矛盾的技术途径,使得高光束质量、高重复频率、高功率激光器成为可能。

SBS介质是SBS-PCM的核心之一,它是影响激光系统输出稳定性、光束质量、脉冲波形等特性的关键因素之一。SBS介质分为气体、固体、液体三类。气体SBS介质密度小,需要使用高压增加介质的密度,进而使得SBS的增益系数变大。高压一方面给实验操作带来危险,另一方面导致声子寿命过长,不适合在短脉冲激光器中使用,现在很少用气体作为SBS介质,因此本文主要介绍基于液体和固体介质的SBS-PCM的高重复频率高功率激光系统的研究进展。

#### 3.1 基于液体介质的SBS-PCM的高重复频率高功率激光系统

液体SBS介质具有SBS阈值低、布里渊线宽宽(声子寿命短)、吸收系数小、光学击穿阈值高等优点,已被广泛使用在SBS-PCM中。目前高重复频率高功率激光系统中采用的液体SBS介质主要有Freon113,CS<sub>2</sub>,FC-72,FC-75和丙酮等。基于液体介质的SBS-PCM的高重复频率高功率激光系统研究进展如表1所示,表中DL表示衍射极限。

表1 高重复频率高功率液体SBS-PCM激光系统研究现状一览表

Table 1 Research status of high repetition rate and high power laser with liquid SBS-PCM

Institute	Year	Laser characteristics				SBS properties			Ref.
		Output power /W	Beam quality	Pulse duration on/ns	Repetition rate/ Hz	SBS material	Maximum input power /W	SBS Reflectivity /%	
American TRW	1993	100	1.1DL	7	100	Freon113	30.5	85	[2]
	1997	875	—	7.5	100	Liquid	100	98	[18]
	1997	690	1.1DL	20	2.5k	Liquid	200	—	[19]
	1998	940	2DL	7.5	100	Liquid	100	98	[20]
Technica University of Berlin	1995	100	1.2DL	70	3k	CS <sub>2</sub>	—	—	[21]
	1996	211	Nearly DL	90	100	CS <sub>2</sub>	—	—	[22]
	1998	520	M <sup>2</sup> =5	—	100	CS <sub>2</sub>	—	—	[23]
Osaka University and JAERI	2003	362	1.2DL	30	1k	FC-75	90	—	[24]
	2003	63/125	—	—	30, 50	FC-75	43/55	98/5	[25]
	2004	368	1.5DL	50	50	FC-75/FC-72	147	—	[26]
	2008	500	—	—	100	FC-75/FC-72	—	—	[27]
	2012	766	—	—	100	FC-75/FC-72	—	—	[28]
NCRIE	2003	18	1.3DL	8	40	Liquid	—	—	[29]
CAEP	2006	—	1.3DL	5	400	Acetone	16	65	[30]

1993年,美国TRW公司的Pierre等<sup>[2]</sup>采用SBS-PCM和Zigzag Nd:YAG板条的高功率激光二极管(LD)阵列抽运MOPA系统,得到了平均功率100 W,重复频率100 Hz,1.1倍衍射极限的激光输出。这是首次采用

液体作为 SBS-PCM 介质得到的功率百瓦量级激光系统。

1998年, Pierre等<sup>[20]</sup>采用图3所示的激光系统得到了平均功率940 W, 重复频率100 Hz, 2倍衍射极限的激光输出, 是迄今为止液体作为 SBS-PCM 介质的激光系统得到的最高平均功率, 但是该系统稳定性比较差, 仅能运行15 min。该系统运行在33 Hz时, 可输出单脉冲能量10 J, 1.25倍衍射极限的激光; 运行在50 Hz时, 单脉冲能量也为10 J, 但光束质量变差, 为1.4~1.5倍衍射极限。同时, 他们在实验中证明单池聚焦结构的 SBS-PCM, 在100 W(2 J, 50 Hz)级的入射功率情况下, 能得到高反射率和保真度。

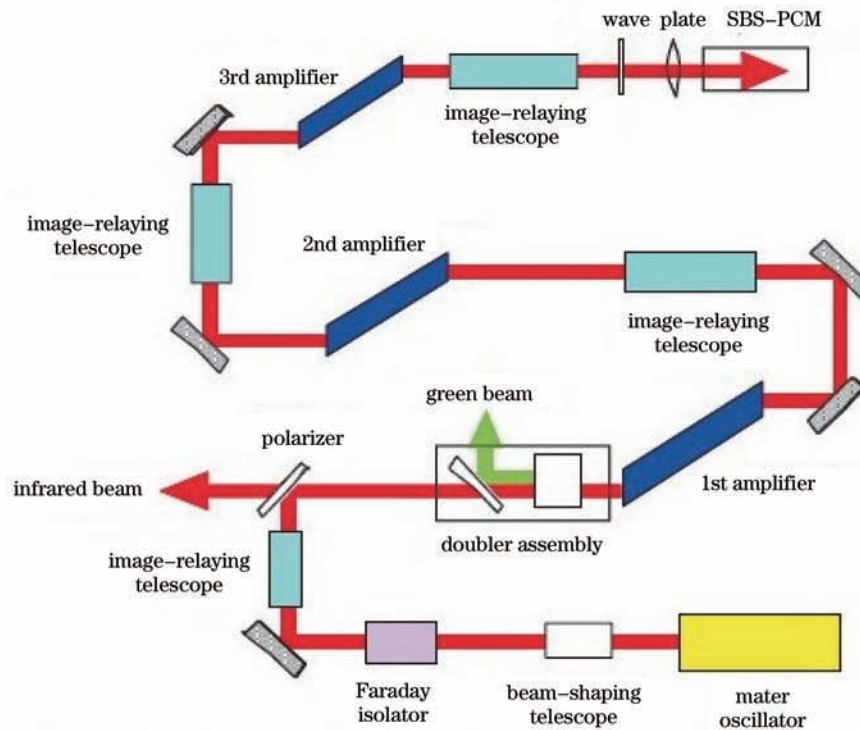


图3 Pierre等<sup>[20]</sup>采用的带 SBS-PCM 的 MOPA 结构示意图

Fig.3 MOPA system with SBS-PCM adopted by Pierre et al.<sup>[20]</sup>

同样在1998年, 德国柏林工业大学的 Eichler等<sup>[23]</sup>把 SBS 相位共轭非相干组束技术应用到高重复频率高功率激光系统中。该激光系统包括一个种子源、六个放大器 and 两个 SBS 相位共轭镜。系统在重复频率100 Hz下获得平均功率520 W的激光输出, 其能量稳定性为3%。由于光束经过第三个放大器产生的相位畸变没有得到补偿, 系统输出的光束质量比较差, 光束质量因子 $M^2$ 为5。

在所有的液体中, 日本大阪大学的 Yoshida等<sup>[26]</sup>发现的 FC-72 和 FC-75 最适合应用在高重复频率高功率激光系统中。FC-72 和 FC-75 的光学击穿阈值高, 从红外到紫外的宽光谱区内的吸收系数都很小, 而且化学性质稳定性, 无毒。2012年, 他们应用 FC-72 和 FC-75 作为相位共轭镜的 SBS 介质, 获得了7.66 J, 100 Hz 国际最高水平脉冲激光器<sup>[28]</sup>。

目前运行在千赫兹重复频率下、带液体介质的 SBS-PCM 的激光器很少<sup>[19,21,24]</sup>。其中, 1997年, Pierre等<sup>[19]</sup>采用 Zigzag 板条种子源、两个 Zigzag 板条放大器和相位共轭镜, 实现了平均功率690 W, 重复频率2.5 kHz, 光束质量为1.1倍衍射极限的激光输出。这是千赫兹重复频率下应用液体 SBS 介质获得的最大输出功率。

我国在液体高重复频率 SBS 相位共轭镜方面的研究与国外差距很大, 2003年才有相关的报道。2003年, 华北光电技术研究所的刘朗等<sup>[29]</sup>完成了一套重复频率40 Hz, 单脉冲能量450 mJ的带 SBS-PCM 的激光器。2006年, 中国工程物理研究院的高清松等<sup>[30]</sup>采用丙酮作为 SBS 相位共轭镜介质, 研究了高重复频率激光系统中的 SBS 相位共轭技术。SBS 相位共轭镜在重复频率400 Hz、注入能量40 mJ的条件下, 反射率为65%。采用光束扫描的方法克服了丙酮液体介质的热效应及恢复时间问题, 但能量稳定性还是比较差的, 为13%。他们同时指出如何采取措施在高重复频率下提高 SBS 反射能量的稳定性有待进一步深入研究。



### 3.2 基于固体介质的SBS-PCM的高重复频率高功率激光系统

固体SBS介质的优点是通过弹光效应可以获得很高的SBS增益,而且不污染环境,稳定性好。但是,固体介质损伤阈值低,容易造成永久性损伤,导致固体中SBS的研究比较滞后。自从1996年德国柏林工业大学的Eichler等<sup>[31]</sup>首次把光纤作为相位共轭镜以来,固体光纤相位共轭技术得到了飞快的发展。基于光纤SBS-PCM的高重复频率高功率激光系统研究进展如表2所示。

表2 高重复频率高功率光纤SBS-PCM激光系统研究现状一览表

Table 2 Research status of high repetition rate and high power laser with fiber SBS-PCM

Year	Laser parameters				Fiber properties			Ref.
	Output power /W	Beam quality	Pulse duration/ns	Repetition rate/kHz	Core diameter/ $\mu\text{m}$	Numerical aperture (NA)	Length /m	
1997	47	—	90	0.1	200	0.22	3.5	[32]
1997	104	—	90	0.1	200	0.22	3.5	[32]
2001	315	$M^2=2.6$	—	2	200	0.22	2	[33]
2003	31	$M^2=1.2$	—	10	50	0.22	10	[34]
2003	71	Nearly DL	—	10	100	0.22	15	[34]
2003	124	$M^2=2.2$	—	3.5	—	—	—	[35]
2010	40.5	$M^2=1.93$	24	0.4	1000	—	3	[36]
2011	52	$M^2=2.3$	1.5	1	1000	—	3	[37]

1996年,Eichler等<sup>[31]</sup>把光纤作为改善光束质量的相位共轭镜应用到激光系统中,获得了平均功率14 W,重复频率3 kHz的高光束质量激光,这对于实现真正带SBS-PCM的全固态激光器具有重要的意义。光纤稳定性好,操作方便,SBS阈值很低,入射面的破坏阈值高达 $1\sim 1.5\text{ GW/cm}^2$ 。虽然光纤的SBS增益系数较小,但只要增加光纤的长度即可得到高的SBS增益,因此光纤相位共轭镜得到了广泛的研究。

2001年,Risebeck等<sup>[33]</sup>采用图4所示的激光系统得到了平均功率315 W,重复频率2 kHz的激光输出,是迄今为止光纤作为相位共轭镜的激光系统得到的最高平均功率。种子源采用具有很强自然双折射的Nd:YALO晶体,输出3.8 W、2 kHz高光束质量的单纵模激光。种子源输出的光束通过隔离器后,被偏振片分成两路。每路光经过两个放大器后产生相位畸变,该畸变波被耦合进光纤相位共轭镜。反射后的相位共轭波再次经过两个放大器后畸变得得到补偿,补偿后的光束被偏振片耦合输出,两路光又组合成一路光。最后系统在2 kHz重复频率下,获得平均功率315 W的激光输出,其光束质量因子 $M^2=2.6$ 。

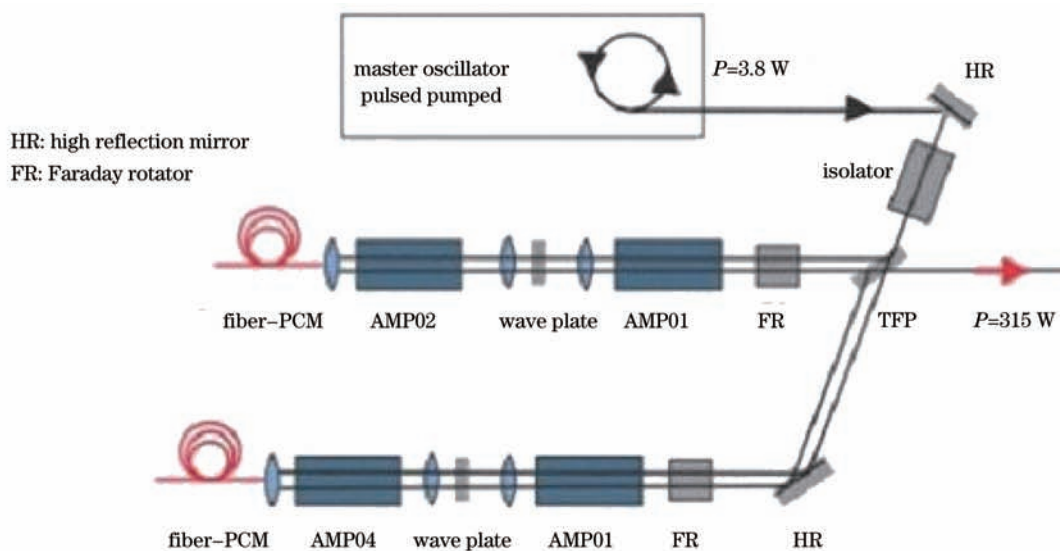


图4 带光纤SBS-PCM的MOPA结构示意图

Fig.4 MOPA system with fiber SBS-PCM

浙江大学在光纤相位共轭镜方面做了大量的研究。2004年,周涛等<sup>[38]</sup>把多模光纤作为相位共轭镜应用到激光系统中,获得了单脉冲能量4.1 mJ,重复频率100 Hz的基模输出。之后,他们对光纤-熔石英棒复合结构SBS-PCM、大口径锥度光纤SBS-PCM等进行了系统的研究,并逐步提高SBS-PCM在高重复频率下的最大注入能量和反射率。2011年,赵智刚等<sup>[37]</sup>对长3 m,前段直径1 mm,尾部直径400  $\mu\text{m}$ 的锥度光纤SBS-PCM进行了详细的实验研究。在抽运脉宽24 ns,重复频率1 kHz,单脉冲能量40 mJ下,得到了高达70%的反射率。把该锥度光纤SBS-PCM应用到激光系统中,抽运脉宽为15 ns时,得到了重复频率1 kHz,功率52 W的激光输出。最后,他们指出了应用光纤SBS-PCM实现1 kHz,100 W高亮度激光输出的可能性。

## 4 结束语

SBS相位共轭镜具有自抽运、实时产生相位共轭波的特点,能够自动补偿放大器和放大系统中的动态和静态畸变,广泛应用在对光束质量要求较高的激光系统中。液体SBS介质光学击穿阈值很高,化学稳定性好,但其在高重复频率下会产生严重的热效应,导致液体介质折射率变化,从而影响系统的稳定性。光纤作为相位共轭镜可以解决高重复频率带来的热效应等问题,但光纤的损伤阈值低,重复频率1 kHz时,最大的注入能量只有40 mJ<sup>[37]</sup>,不能满足激光系统对高能量的要求。

目前,一般采用光束扫描<sup>[30]</sup>或循环池<sup>[39]</sup>的方法解决高重复频率液体SBS介质的热效应和恢复时间等问题。这两种方法一方面增加了系统的复杂程度,另一方面使系统稳定性下降。因此采用新的有效降低焦点重复频率的方法或开发恢复时间小的SBS介质成为解决液体SBS介质应用在高重复频率高功率激光系统中的关键。光纤作为相位共轭镜的主要问题是损伤阈值低,因此提升光纤的损伤阈值或开发新的固体SBS介质将成为国内外研究的热点。

## 参考文献

- 1 T Riesbeck, E Risse, H J Eichler, *et al.*. Pulsed solid-state laser systems with high brightness by fiber phase conjugation [C]. SPIE, 2003, 5120: 494-499.
- 2 Randall J St Pierre, Hagop Injeyan, Rodger C Hilyard, *et al.*. One joule per pulse, 100 Watt, diode-pumped, near diffraction limited, phase conjugated, Nd:YAG master oscillator power amplifier [C]. SPIE, 1993, 1865: 2-8.
- 3 Osterink L M, Foster J D. Thermal effects and transverse mode control in a Nd:YAG laser [J]. Appl Phys Lett, 1968, 12 (4): 128-131.
- 4 Foster J D, Osterink L M. Thermal effects in a Nd:YAG laser [J]. J Appl Phys, 1970, 41(9): 3656-3663.
- 5 J J Zayhowski, A L Wilson Jr. Short-pulsed Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG passively Q-switched microchip lasers [C]. CLEO2003, 2003. CThF2.
- 6 K Tei, F Matsuoka, M Kato, *et al.*. Nd:YAG oscillator-amplifier system with a passive ring self-pumped phase-conjugation mirror [J]. Opt Lett, 2000, 25(7): 481-483.
- 7 B Y Zel'dovich, V I Popovichev, V V Ragul'skii. Connection between the wave fronts of the reflected and exciting light in stimulated Mandel'shtam-Brillouin scattering [J]. Sov Phys JETP Lett, 1972, 15(3): 109-113.
- 8 Liu Chi, Leng Jinyong, Qi Yunfeng, *et al.*. Stimulated Brillouin scattering in single frequency, single mode, linearly polarized Ytterbium doped fiber amplifier [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502001.  
刘 驰, 冷进勇, 漆云凤, 等. 单频保偏掺Yb光纤放大器中的受激布里渊散射实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502001.
- 9 Du Wenbo, Wang Xiaolin, Han Kai, *et al.*. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high power narrow linewidth fiber amplifier with phase modulation [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1105009.  
杜文博, 王小林, 韩 凯, 等. 相位调制法抑制高功率窄线宽光纤放大器中的受激布里渊散射[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1105009.
- 10 Li Hongbing, Jin Yanyun, Fang Jinghui, *et al.*. Temperature sensing of crystal fiber filled with liquid via SBS [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(12): 120602.  
李红兵, 金艳云, 方靖淮, 等. 基于SBS的填充液体的光子晶体光纤温度传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(12): 120602.
- 11 Wang Zhenbao, Shao Bibo, Zhang Lei, *et al.*. Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in fiber [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 090603.

- 王振宝, 邵碧波, 张磊, 等. 光纤受激布里渊散射阈值分析与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 090603.
- 12 F A Starikov, A O Shkrebko. Numerical investigation of spherical aberration influence on the phase conjugation quality at SBS [C]. SPIE, 2004, 5481: 1-10.
- 13 J L Ayrál, J Montel, J P Huinard. Master oscillator-amplifier Nd:YAG laser with a SBS phase-conjugate mirror [C]. SPIE, 1991, 1500: 81-92.
- 14 D A Rockwell, M S Mangir, J J Ottusch. Energy scaling of phase-conjugate solid state lasers [C]. SPIE, 1992, 1627: 56-64.
- 15 C B Dane, L E Zapata, W A Neuman, *et al.*. Design and operation of a 150 W near diffraction-limited laser amplifier with SBS wavefront correction [J]. IEEE J Quantum Electron, 1995, 31(1): 148-163.
- 16 Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei, *et al.*. Nonlinear Optics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003. 351-352.  
石顺祥, 陈国夫, 赵卫, 等. 非线性光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003. 351-352.
- 17 O Y Nosach, V I Popovichev, V VRagul'skii, *et al.*. Cancellation of phase distortions in an amplifying medium with a Brillouin mirror [J]. Sov Phys JETP Lett, 1972, 16(8): 617-620.
- 18 Randall J St Pierre, David W Mordaunt, Hagop Injeyan, *et al.*. Diode array pumped kilowatt laser [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 1997, 3(1): 53-58.
- 19 Randall J St Pierre, Gerald W Holleman, Marcy Valley, *et al.*. Active tracker laser (ATLAS) [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron, 1997, 3(1): 64-70.
- 20 Randall J St Pierre, David W Mordaunt, Hagop Injeyan, *et al.*. Diode array pumped kilowatt laser [C]. SPIE, 1998, 3264: 2-8.
- 21 H J Eichler, A Haase, R Menzel. 100-watt average output power 1.2 diffraction limited beam from pulsed neodymium single-rod amplifier with SBS phase conjugation [J]. IEEE J Quantum Electron, 1995, 31(8): 1265-1269.
- 22 H J Eichler, A Haase, O Mehl. Serial arrangement for high power solid-state amplifiers with phase conjugating mirror [C]. SPIE, 1996, 2788: 148-156.
- 23 A Dehn, H J Eichler, A Haase, *et al.*. Phase conjugation for improvement of solid state and excimer lasers [C]. SPIE, 1998, 3403: 65-76.
- 24 H Kiriya, K Yamakawa, T Nagai, *et al.*. 360-W average power operation with a single-stage diode-pumped Nd:YAG amplifier at a 1-kHz repetition rate [J]. Opt Lett, 2003, 28(18): 1671-1673.
- 25 H Yoshida, M Nakatsuka, T Hatae, *et al.*. YAG laser performance improved by stimulated Brillouin scattering phase conjugation mirror in Thomson scattering diagnostics at JT-60 [J]. Jpn J Appl Phys, 2003, 42(2A): 439-442.
- 26 H Yoshida, M Nakatsuka, T Hatae, *et al.*. Two-beam-combined 7.4 J, 50 Hz Q-switch pulsed YAG laser system based on SBS phase conjugation mirror for plasma diagnostics [J]. Jpn J Appl Phys, 2004, 43(8A): 1038-1040.
- 27 T Hatae, T Hayashi, S Kajita, *et al.*. Recent progress in development of Nd:YAG laser for ITER edge Thomson scattering diagnostics [C]. Proceedings of ITC18, 2008. PZ-51.
- 28 T Hatae, E Yatsuka, T Hayashi, *et al.*. Development of a YAG laser system for the edge Thomson scattering system in ITER [J]. Rev Sci Instrum, 2012, 83(10): 10E344.
- 29 Liu Lang, Mi Guojiang, Huang Maoquan, *et al.*. High repeating rate and big energy single-longitudinal mode laser [J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(10): 885-889.  
刘朗, 秘国江, 黄茂全, 等. 高重复频率大能量单纵模激光器[J]. 中国激光, 2003, 30(10): 885-889.
- 30 Gao Qingsong, Tong Lixin, Chen Xiaolin, *et al.*. High pulse repetition rate double pass amplifier with the liquid phase conjugating mirror [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(9): 1465-1468.  
高清松, 童立新, 陈晓琳, 等. 液体相位共轭技术在高重复频率双程放大器中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(9): 1465-1468.
- 31 H J Eichler, A Haase, B Liu, *et al.*. Design and construction of high power solid-state laser amplifiers with phase conjugating mirror [C]. SPIE, 1996, 2889: 8-19.
- 32 H J Eichler, A Haase, J Kunde, *et al.*. Fiber phase conjugator as reflecting mirror in a MOPA arrangement [C]. SPIE, 1997, 2986: 46-54.
- 33 Th Risebeck, E Risse, H J Eichler, *et al.*. Pulsed solid-state laser system with fiber phase conjugation and 315 W average output power [J]. Appl Phys B, 2001, 73(8): 847-849.
- 34 T Riesbeck, E Risse, H J Eichler. Pulsed solid state laser systems with high brightness by fiber phase conjugation [C]. SPIE, 2003, 5120: 494-499.

- 35 T Riesbeck, H J Eichler, E Risse, *et al.*. High brightness solid state laser systems with fiber phase conjugate mirrors for micro material processing [C]. SPIE, 2003, 4977: 46-56.
- 36 Zhao Zhigang, Cui Lingling, Tong Lixin, *et al.*. All-solid-state high pulse repetition rate high pulse energy single-longitudinal-mode MOPA laser system with solid-state phase conjugating mirror [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(12): 2949-2953.  
赵智刚, 崔玲玲, 童立新, 等. 带固体相位共轭镜的全固态脉冲抽运高重复频率大能量单纵模 MOPA 激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 2949-2953.
- 37 Zhao Zhigang, Dong Yantiao, Pan Sunqiang, *et al.*. Investigation on characteristics of large aperture tapered fiber phase conjugation mirror for kHz high energy MOPA laser system [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0402007.  
赵智刚, 董延涛, 潘孙强, 等. 用于千赫兹高能量 MOPA 激光系统的大口径锥度光纤相位共轭镜特性研究[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0402007.
- 38 Zhou Tao, Chen Jun, Tang Chun, *et al.*. Fiber phase-conjugator in four-pass MOPA system with high repetition rate [J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(4): 441-444.  
周涛, 陈军, 唐淳, 等. LD 抽运高重复频率四通放大 MOPA 系统中的光纤相位共轭研究[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 441-444.
- 39 Yulei Wang, Zhiwei Lü, Qi Guo, *et al.*. A new circulating two-cell structure for stimulated Brillouin scattering phase conjugation mirrors with 1-J load and 10-Hz repetition rate [J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(11): 1064-1066.