

## 光纤相位共轭镜的研究\*

后运飞 刘耀兰 王 英 丘军林

Eichler H J, Liu B

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

(德国柏林技术大学光学研究所)

**摘要:** 受激布里渊散射作为相位共轭的一种手段可以在保证光束质量的前提下有效地提高固体激光的功率。作者系统地介绍了光纤相位共轭的理论以及在这一领域实验研究的进展情况, 并对其中的几项关键技术如控制光纤的退偏和单纵模激光器的制作等进行了讨论。

**关键词:** 受激布里渊散射 相位共轭 光束质量 退偏 单纵模激光器

### Research on fibre phase-conjugating mirrors

Hou Yunfei, Liu Yaolan, Wang Ying, Qiu Junlin

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Eichler H J, Liu B

(Optical Institute of Technical University, Berlin, Germany)

**Abstract:** As a means of phase conjugation, SBS (stimulated Brillouin scattering) can increase the power of solid lasers with high beam quality. The paper focus on the theories of fibre phase conjugation and development of the region. The key technology such as the control on depolarization of fiber and design of single-frequency laser is also studied.

**Key words:** stimulated Brillouin scattering phase conjugation beam quality depolarization single-frequency laser

### 引 言

固体激光器由于在体积、维护和运行费用等方面的优势, 越来越广泛地应用于工业加工。但是也存在一些缺陷, 其中最主要的问题就是由于高注入功率对激光激活介质的影响而产生的介质密度无规则变化, 使输出光的相位面产生十分严重的畸变, 这对于激光加工产生了不利的影响。最有效的解决办法就是应用相位共轭技术<sup>[1, 2]</sup>。

使用受激布里渊散射(SBS)产生相位共轭时<sup>[3]</sup>, 光被SBS单元反射, 二次通过畸变源后, 可以消除光波畸变。这种技术还被用于补偿红宝石放大器中的相位畸变<sup>[4]</sup>, 由此证明了通过主振荡器-功率放大器(MOPA)系统不仅可以获得高能量的激光, 并且其光束质量可以接近衍射极限。

使用石英光纤相位共轭镜技术操作比较简单, 无需高压, 并且是无毒的。

下面介绍相位共轭镜及光纤相位共轭的理论、目前有关光纤相位共轭实验的最新进展, 最后着重讨论光纤相位共轭中的关键——主振荡器。

\* 中德科技合作项目。

### 1 理论研究

对光波能实现相位共轭作用的光学系统称为相位共轭镜。相位共轭镜的共轭特性可由图 1 得到说明。由图 1 可看出共轭镜和普通反射镜对以点光源发射的探测光波的影响。从点光源发射的发射光束,经共轭镜反射后,形成一会聚共轭光束,此光束精确地沿入射探测光的路径返回,因此,按时间反演的定义,它返回到原始点光源处。相反,对普通的反射镜,使反射波继续发散。

理想的共轭镜能够瞬时反演入射光波的偏振态。例如,右旋圆偏振的探测波经相位共轭镜反射后仍为右旋圆偏振。相反,对于普通反射镜,右旋圆偏振的入射波反射后变为左旋圆偏振。

布里渊散射是获得相位共轭的一种比较理想的办法,它是入射光波场与介质内的弹性声波场相互作用而产生的一种光散射现象。散射光的频率相对于入射光的频率发生变化,并且,这种变化的大小与散射角和散射介质内的声波场特性有关。在受激布里渊散射过程中,介质由于电致伸缩效应可以产生一种相干的声波场,它与入射激光耦合而产生受激布里渊散射的相干辐射。如果入射激光足够强,以致于介质内由电致伸缩效应产生的声波场和相应的散射光波场的增益大于它们各自的损耗,则将出现介质内感应声波场与布里渊散射光波场的受激放大或振荡。

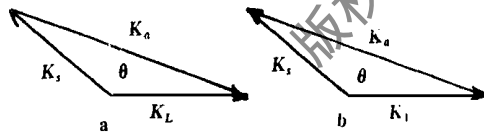


Fig. 2 Momentum matching of Brillouin backward scattering  $K_L$ ,  $K_s$  and  $K_a$ —indicate momenta of input photon, scattering photon and inducing phonon

的动量匹配图如图 2a 所示,当散射光的方向与入射光的方向相反时,散射光有最大频移量  $\Delta\nu = -2\nu_L n_L \nu_a / c$ ,  $\nu_L$  和  $\nu_a$  分别表示入射光子和感应产生的声子的频率;  $n_L$  表示入射介质的折射率;  $c$  表示真空中的光速; 第二种过程是湮灭一个入射光子和一个声子同时产生一个散射光子,相应的动量匹配图如图 2b 所示,当散射光的方向与入射光的方向相反时,散射光有最大频移量  $\Delta\nu = 2\nu_L n_L \nu_a / c$ 。

在光纤中入射波和斯托克斯波满足如下的基本关系<sup>[6]</sup>:

$$dI_S/dz = -g_B I_L I_S + \alpha I_S, \quad dI_L/dz = -g_B I_L I_S - \alpha I_S \tag{1}$$

式中,  $g_B$  为布里渊增益系数,  $I_L$  为入射光光强,  $I_S$  为散射光光强,  $\alpha$  为光纤损耗, 假定入射波

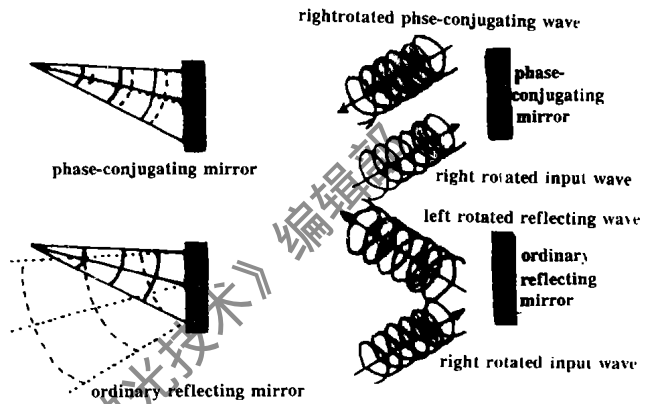


Fig. 1 Comparison between phase-conjugating mirror and ordinary reflecting mirror solid line—indicates input wave dotted line—indicates reflecting wave

以后向散射为例,根据场的量子理论<sup>[5]</sup>,可以将受激散射过程看作是光子场与声子场之间的相干散射过程。此时,入射光子、散射光子和表征声波场量子化的准粒子(声子)三者之间必须满足能量守恒和动量守恒条件。存在两种散射过程,第一种过程是湮灭一个入射光子,同时产生一个散射光子和一个感应声子,相应的

和斯托克斯波有相同的光纤损耗。在无光纤损耗的情况下 ( $\alpha = 0$ ), 上式可以写成:

$$d(I_S - I_L) / dz = 0 \tag{2}$$

即在 SBS 过程中能量守恒。

为了得到更为直观的物理图像, 忽略泵浦消耗, 由强度耦合方程可得:

$$I_S(0) = I_S(L) \exp(g_B P_0 L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}} - \alpha L) \tag{3}$$

式中,  $P_0 = I_L(0) A_{\text{eff}}$ ,  $A_{\text{eff}}$  为有效纤芯截面,  $L_{\text{eff}}$  为有效作用长度:

$$L_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha \tag{4}$$

方程(4)等价于在增益完全等于光纤损耗处每一个模式注入一个虚拟光子, 并可得到:

$$g_B P_0^r L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}} \approx 21 \tag{5}$$

若假定声波是以  $\exp(-t/T_B)$  衰减的, 则布里渊增益具有洛伦兹频谱轮廓:

$$g_B(\nu) = \{(\Delta\nu_B/2)^2 / [(\nu - \nu_B)^2 + (\Delta\nu_B/2)^2]\} g_B(\nu_B) \tag{6}$$

式中,  $\Delta\nu_B$  是频谱半极大处的全宽度, 它与声子寿命的关系为  $\Delta\nu_B = (\pi T_B)^{-1}$ , 在  $\nu = \nu_B$  处布里渊增益系数峰值为:

$$g_B(\nu_B) = 2\pi n_{12}^2 p_{12}^2 / (c \lambda_L^2 \rho_0 v_A \Delta\nu_B) \tag{7}$$

式中,  $p_{12}$  为纵向弹光系数,  $\rho_0$  为材料密度,  $\lambda_L$  为泵浦波长,  $v$  为声波在介质内传播时的声速。

对于光纤而言, SBS 的相互作用长度可与光纤长度相比拟, 当泵浦光带宽(FWHM)为  $\Delta\nu_L$

且是洛伦兹线形的特殊条件下, 其峰值增益为:  $g_B = \Delta\nu_B / (\Delta\nu_B + \Delta\nu_L) \cdot g_B(\nu_B)$  (8)

$\Delta\nu_B$  一般小于 100MHz, 所以, 当  $\Delta\nu_L \gg \Delta\nu_B$  时, 布里渊增益下降到原来的  $\Delta\nu_B / \Delta\nu_L$ 。另外, 由于 SBS 中参与的是声频声子, 所以, 对于脉宽小于 10ns 的短脉冲泵浦, SBS 几乎不会发生。

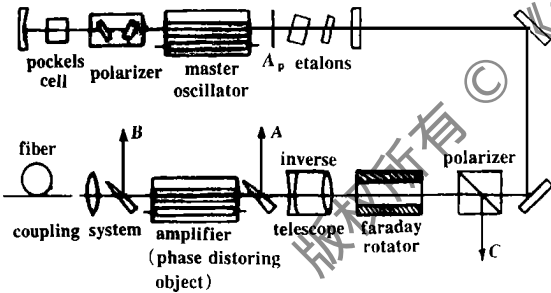


Fig. 3 Set-up of MOPA system with fibre phase-conjugating mirror

退偏现象, 这样就很难有效地将其与主振器进行隔离, 因而导致主振器工作不稳定甚至损伤。所以, 在切割光纤包层和移动放置光纤时一定要特别小心, 避免使其受到机械应力, 这样可以将退偏减小至 5% 以下。

图 4 为图 3 中用 CCD 在 A, B 和 C 处测量到的激光相位面轮廓图。从图中我们可以看到, 光纤相位共轭镜大大改善了出射光的光束质量。

为了获得较低的阈值功率, 对于不同芯径的光纤在同一实验条件下进行测量, 得到如下的

## 2 实验研究

首先给出一种有代表性的 MOPA 装置(图 3)。另外还有几种类似的装置图<sup>[7]</sup>, 其原理基本相同。

固体激光加工中最常用的是 1064nm 波长的激光, 在稳定运行情况下, 当功率大于阈值 10 倍以上时, 保真度可达到 91%, 起伏小于 2%。

在波导中, 一般情况下反射光会出现

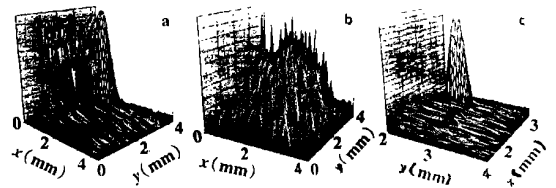


Fig. 4 Transverse beam profile a—input beam b—behind phase distortions c—SBS double pass

一组数据:

Table 1 Summary of SBS parameters for different fibre core diameters (coherence length 50 cm)

core diameter ( $\mu\text{m}$ )	power threshold (kW)	reflectivity (%)	fidelity (%)	maximum power (kW)	maximum $M^2$
400	29	40	62 $\pm$ 3	1300	130
200	17	54	93 $\pm$ 2	310	64
100	6.4	51	91 $\pm$ 2	80	32
50	2.0	53	70	20	16

从表 1 知: 芯径越小, 阈值越低。

实验表明, 要获得稳定的 SBS 过程, 入射光功率应为阈值功率的 10 倍。这时的保真度为 91% 左右, 并且其起伏小于 2%, 这和我们的光脉冲功率测量的噪声为同一量级。

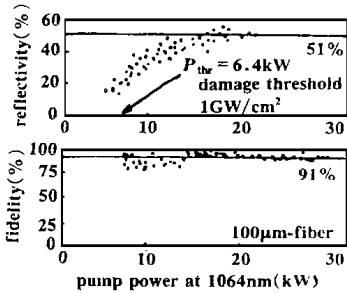


Fig. 5 SBS reflectivity and fidelity of a 100 $\mu\text{m}$  fiber phase conjugator at 1064nm wavelength

对于光纤的选择, 还有两点必须考虑。首先, 由于整个光束横截面对于 SBS 过程都有贡献, 所以必须要保证光束能完全地进入光纤, 不然就会引起 SBS 反射率、保真度严重下降, 阈值大幅提高。因此, 需要光纤的数值孔径或入射角要大于光束发散角。对于数值孔径为  $NA$ , 芯径为  $d$  的光纤而言, 可以接受的光束的最大  $M^2$  参数为:

$$M_{\text{fiber}}^2 \approx (NA \cdot d/2) / (N\pi) \quad (9)$$

其次是光纤端面的损伤阈值:

$$P_{\text{max}} = 1\text{GW/cm}^2 \cdot \pi(d/2)^2 \quad (10)$$

同时要注意, 端面上的光功率是入射光功率和反射光功率叠加, 所以, 实际入射光功率不要大于  $500\text{MW/cm}^2$ 。但对于某些端面抛光的光纤, 曾观察到入射功率可达  $1.5\text{GW/cm}^2$ 。

表 2 给出不同波长条件下进行测量的结果。由表 2 可知, 波长越长, 保真度越高, 不过阈值功率也高。对以上 3 种波长而言, 反射率都在 50% 以上。

Table 2 SBS parameters of 100 $\mu\text{m}$  fibre phase conjugators at wavelengths from the IR to the UV

wavelength (nm)	reflectivity (%)	power threshold (kW)	fidelity (%)
1064	51	6.4	91
532	51	3.3	> 70
355	62	3.0	> 70

### 3 主振器

布里渊线宽  $\Delta\nu_B \sim 100\text{MHz}$ , 所以主振器的线宽  $\Delta\nu_m \sim 100\text{MHz}$ , 由于激光器的纵模间隔  $\Delta\nu_{sp} \sim 100\text{MHz}$ , 所以, 最理想的情况是使用单频激光器, 即激光器内只有一个纵模起振。

但是, 制作单频激光器却是一项十分复杂的工作。首先, 我们讨论选频问题。要选单频, 必须保证激光器是在单横模状态下运行的。这有很多种方式可以实现, 不过最简单的方法还是在谐振腔内插入一个适当口径的孔阑并使用特殊的腔镜, 这样, 就可以保证激光器是单横模运转了。这时, 激光器内有多纵模在同时起振, 如何压制那些非主频的纵模呢? 一个简单的办法就是在谐振腔内插入 F-P 标准具<sup>[8]</sup>。

由 F-P 标准具的透过特性我们可以知道, 只有有限的纵模可以以比较大的透过率通过 F-P 标准具, 换言之, 也只有这些纵模才能够起振, 即起振纵模间隔比较大。因此, 我们可以考虑在

谐振腔内同时插入两块或三块 F-P 标准具, 只要它们的厚度或反射率不同, 则其起振纵模间隔互不相同, 只有互相重叠的最大透过模才能起振, 这样就能进一步限制能够起振的纵模数。

如果将谐振腔的透射镜也换成 F-P 标准具, 适当选择厚度和反射率, 这样, 整个谐振腔的模式特性, 就是由其中插入的 F-P 标准具的透射曲线和反射曲线的包络, 只要适当选择它们的厚度、反射率或倾斜角度就可以获得窄带宽输出。

但是, 这种方法也有缺点, 一是腔内插入的 F-P 标准具越多, 损耗也越大, 唯一的办法就是增大注入功率; 二是频率的稳定比较困难。

由以上选频的方式可以看出, 只要谐振腔的长度、F-P 标准具的厚度或倾斜角度稍微发生一点变化, 都会使出射光的频率发生改变甚至不出光, 因此稳频非常重要。

一般来说, 不加稳频装置的激光谐振腔, 其稳定出光时间为几秒至一两分钟左右, 这显然不适合于实际需要。比较常用的稳频方法就是加入一套实时反馈系统<sup>[9]</sup>, 由于频率在要改变时, 出光功率会下降, 所以这套系统就是根据出光功率的改变调整腔长、距离和角度, 这样, 可以使频率稳定相当长的时间。

#### 4 结束语

在以 Nd:YAG 作为激活介质的 MOPA 系统中, 由于热透镜效应得到了有效的补偿, 使得光束质量和输出功率之间没有直接关系, 因此, 证明光纤相位共轭镜作为一种有力的手段, 可以将高功率固体激光的光束质量提高到接近衍射极限的水平。

#### 参 考 文 献

- 1 Eichler H J, Haase A, Liu B *et al.* SPIE, 1995; 2771: 13
- 2 Kummrow A, Eichler H J, Chen J *et al.* Laser Ultrafast Processes, 1991; 4: 94
- 3 Zef dovich B Y, Popovichev V I, Ragul'skii V V *et al.* JETP Lett, 1972; 15: 109
- 4 Nosach O Y, Popovichev V I, Ragul'skii V V *et al.* JETP Lett, 1972; 16: 617
- 5 范琦康, 吴存恺, 毛少卿. 非线性光学: 南京: 江苏科学技术出版社, 1989: 137
- 6 Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics, 2nd ed, Boston: Academic Press, 1995: 292
- 7 Eichler H J, Kunde J, Liu B. Opt Commun, 1997; 139: 327
- 8 Danielmeyer H G. IEEE J Q E, 1970; QE6(2): 101
- 9 Teets R E. IEEE J Q E, 1984; QE20(4): 326

作者简介: 后运飞, 男, 1974 年 2 月出生。硕士研究生。从事光纤非线性效应方面的应用研究。

收稿日期: 1998-10-05 收到修改稿日期: 1999-04-12