

带受激布里渊散射池的位相共轭激光器 输出的空间特性*

陈 军 龙 鹰

(浙江大学光学工程系, 杭州 310027)

提 要

本文应用传输矩阵的方法对受激布里渊散射位相共轭腔输出的空间特性进行了分析及编程计算,给出了各种参数下受激布里渊散射-位相共轭腔的传输光束轮廓图,同时给出了实验结果与之相比较,提出了设计受激布里渊散射共轭腔时应注意的问题及几种实用的受激布里渊散射位相共轭腔的腔型。

关键词 受激布里渊散射, 位相共轭腔。

众所周知,高功率固体激光器由于被泵浦的激活介质中静态位相缺陷或瞬态热透镜效应将导致光束质量降低,位相共轭技术则一直被希望用以补偿此位相失真.作者曾介绍了用液体丙酮及高压SF₆气体作受激布里渊散射介质的位相共轭激光器^[1,2].本文将先从传输矩阵理论出发对位相共轭腔的空间特性作一分析,而后与实验结果进行对照.实验表明,在受激布里渊散射腔腔长为1.2 m时,得到了很好的输出光斑空间模式,其脉冲能量在100 mJ以上,脉宽在20~25 ns,光斑直径在2~3 mm,因此有极高的能量密度.在重复率为10 Hz时仍有较小的发散角及较好的空间模式,甚至在YAG棒已有缺陷的情况下仍可在调Q状态下得到较好的输出光空间模式.

1 由后向受激布里渊散射构成的位相共轭腔

设在位相共轭腔中(图1)复参数为 $q_i, PCM(\omega_i, \rho_i)$ 的高斯光束入射到布里渊介质中,在理想情况下,其后向布里渊散射光束仍保持为高斯光束,设其复参数为 $q_s, PCM(\omega_s, \rho_s)$,则由其位相共轭特性必有 $\rho_s = -\rho_i, \omega_s = \beta\omega_i$,其中 β 为小于1的常数,描写了后向散射后光斑缩小的程度.则受激布里渊散射-位相共轭镜反射的变换矩阵为^[3]:

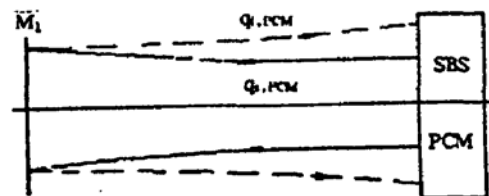


Fig. 1 Beam spatial structure in the SBS-PCR

收稿日期:1992年11月2日;收到修改稿日期:1992年12月28日

* 本课题为国家自然科学基金及国家教委优秀青年科学基金支持项目

$$T_{PCM} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_1} - \frac{i\lambda}{\pi} \frac{1 - \beta^2}{\beta^2 \omega_1^2} & 1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

受激布里渊散射-位相共轭镜可看作具有准高斯反射率的反射镜,其振幅反射率为 $R(r) = R(0) \exp[-r^2(1 - \beta^2)/\beta^2 \omega_1^2]$,其曲率半径可变,等于入射光束等相面曲率半径.按往返一周的自洽条件可分别求出在腔内往与返的光束在位相共轭镜上及在输出镜 M_1 上的光斑大小及曲率半径分别为:

$$\begin{aligned} \omega_{s, PCM}^2 &= 2\lambda |bG_1| / \pi\beta, & \omega_{r, PCM}^2 &= 2\lambda\beta |bG_1| / \pi, \\ \rho_{s, PCM} &= -\rho_{r, PCM} = 2bG_1 / (2dG_1 - 1), & \omega_{s, M_1}^2 &= \omega_{r, M_1}^2 = \lambda(1 + \beta^2) |b/G_1| / 2\pi\beta, \\ \rho_{s, M_1} &= b(1 + \beta^2) / [a(1 + \beta^2) - 2\beta^2 G_1], & \rho_{r, M_1} &= b(1 + \beta^2) / [2G_1 - (1 + \beta^2)a], \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $G_1 = a - b/R_{M_1}$, $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ 为腔内不包括 M_1 及位相共轭镜时的单程传输矩阵,当受激布里渊散射腔内无实元件时, $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_{SBS} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$.当腔内存在位相畸变时,例如激活介质中的热透镜效应,由于共轭关系 $q_{s, PCM} = -q_{r, PCM}^*$ 使畸变在往返一周后抵消,而纯粹由激活介质增益造成的光束结构变化极小,可忽略不计.根据以上结果编写了计算程序求出受激布里渊散射-位相共轭腔的腔内及腔外光束轮廓,同时也对带望远镜系统的普通起始腔编写了类似的程序以形象地观察各种结构形式下的受激布里渊散射-位相共轭腔及起始腔光束空间分布情况.应当注意的是对应于入射到共轭镜及反射回来的光束结构显然不同,因此不能利用 G_1, G_2 直接从一般式 $\omega_0^2 = (\lambda b/\pi) \sqrt{G_1 G_2 (1 - G_1 G_2)} / (G_1 + a^2 G_2 - 2a G_1 G_2)$ 及 $L_{01} = b G_2 (a - G_1) / (G_1 + a^2 G_2 - 2a G_1 G_2)$, $G_2 = d - b/\rho_{r, PCM}$ 来求两种情况下的束腰 ω_0 及位置 L_{01} ,因为此时 G_1, G_2 是按真镜 M_1 的曲率半径求的,它并不代表 M_1 处的等相面曲率半径.往与返的光束具有不同的 ω_0 及 L_0 ,为此利用(2)式中求出的二组参数 $\omega_{s, M_1}, \rho_{s, M_1}$ 及 $\omega_{r, M_1}, \rho_{r, M_1}$,应用高斯光束中一般关系:

$$\omega_0^2 = \omega^2(z) \left[1 + \left(\frac{\pi \omega^2(z)}{\lambda \rho(z)} \right)^2 \right]^{-1}, \quad L_0 = \rho(z) \left[1 + \left(\frac{\lambda \rho(z)}{\lambda \omega^2(z)} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (3)$$

来求出两种情况下相应的 ω_0 和 L_0 ,从而求出任意位置上的光斑半径 $\omega(z)$ 及相应的远场发散角 θ .这样就可把理论计算的光束结构用图表示.图 2 给出了按此程序计算的三种不同结构(腔长 $L_{SBS} = 60 \text{ cm}, 120 \text{ cm}$ 、输出镜 $R_{M_1} = \infty, -1.5 \text{ m}$)下的位相共轭腔内外光束轮廓.其中横坐标为 0 处即输出镜 M_1 的位置,横坐标 E 值为谐振腔长度,负值为光束输出方向.为了确定实际上的 β 值,计算中假设了不同的 β 值,以便将计算轮廓与实验测得的近远场光斑直径作对比,从而确定最佳 β 值.图 3 给出了按程序计算的选 $\beta = 0.3, 0.6, 0.9$ 时的腔内外光束结构.

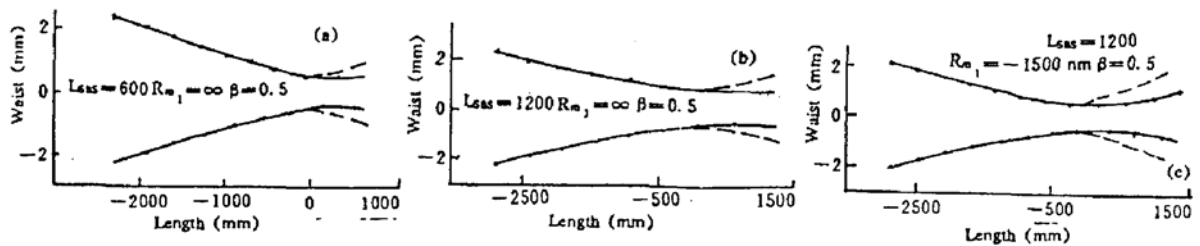


Fig. 2 Laser beam spatial structure from the different PCR with $\beta = 0.5$. where L_{SBS} is the length of SBS PCR and R_{M_1} the curvature radius of the output mirror M_1

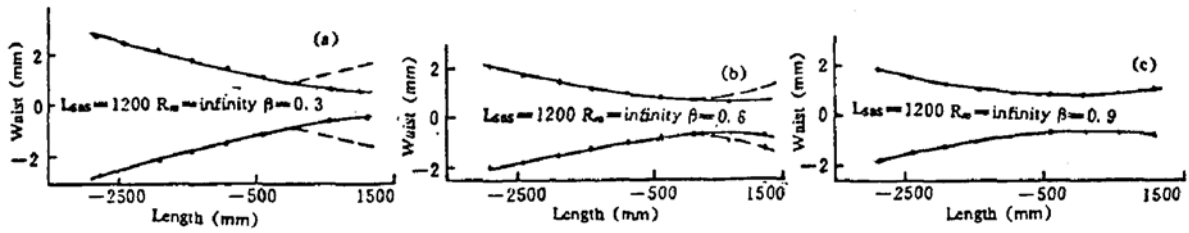


Fig. 3 Laser beam spatial structure from the SBS-PCR ($L_{SBS} = 1.2$ m, $R_m = \text{infinity}$) with the different β values

2 实验结果及几点讨论

实验装置如图 4 所示,其中 M_1 、 M_2 为平面镜,其反射率分别为 30% 及 100%, T 为衰减片,受激布里渊散射池由高压 SP_6 气体(2.2 MPa)及池内望远镜系统组成,现对几种情况进行了测试,讨论如下:

1) 对受激布里渊散射腔长度为 $L_{SBS} = 60$ cm、120 cm 时,近远场调 Q 激光输出进行了测量比较,显然在 60 cm 短腔长时的远场发散角增大,这点与图 2 中的理论计算相符.说明为获得较小的发散角,宜采用长腔.图 5(a)~(d)示出了重复率 1 Hz 时近、远场输出光斑.相应腔长 $L_{SBS} = 126$ cm.图 6 示出了此时在远场(离输出镜 2.5 m 处)用一维 CCD 列阵测得的光强分布,按此值算得的发散角 $2\theta = 1.09$ mrad;而按图 3(c)的理论计算值由束腰 ω_0 计算的发散角 $2\theta = 0.99$ mrad.当然在测量中有一定误差值,但对腔长变化的依赖趋势是完全一致的.

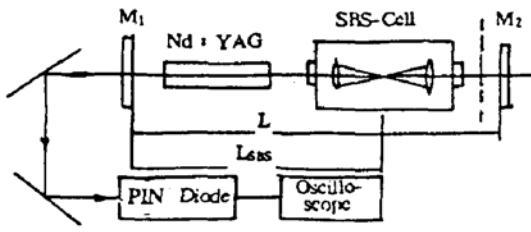


Fig. 4 Experimental arrangement

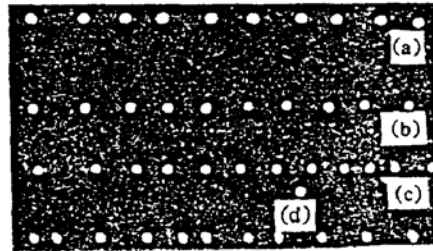


Fig. 5 Laser spots at the near and far fields. The distance between spots and M_1 are: a) 2.5 m b) 1.2 m c) 0.45 m d) 0.1 m

2) 对不同曲率半径的输出镜 M_1 及辅助镜 M_2 作了试验,例如取 $R_1 = -1.5$ m 时,由于 M_1 上光斑过小导致能量密度超过损伤阈值致使 M_1 损坏.而取 $R_2 = 3$ m 时,仍可得到较好的输出.比较结果说明以取 $R_1 = R_2 = \infty$ 为最佳.

3) 分别对重复率为 1、2、5、10 Hz 进行了试验.结果表明,在重复率发生变化时远场光斑直径稍有变化,但变化极小.图 7 示出了在各重复率下近场(45 cm 处)及远场(2.5 m)处的光斑.分析其原因可能是由于当腔内有位相干扰时,虽然理论上位相共轭可抵消干扰,但由于起始腔初始光束结构也受到干扰例如热透镜的影响使受激布里渊散射池中光束聚焦点位置略有变化,使 L_{SBS} 有小的改变而影响输出光束结构.因此受激布里渊散射-位相共轭镜的位相补偿效应是不完善的.

4) 利用受损的 YAG 棒(在两镀膜面及棒内 5 mm 深处均有损坏斑)作激活介质,仍得到了光斑质量完好的调 Q 脉冲激光输出.

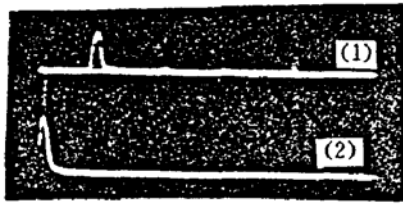


Fig. 6 The beam profile in the far field measured with one-dimensional CCD-Array (curve 1.). The curve 2. is the temporal profile of Xe-lamp pumping intensity on which a Q-switched laser pulse is overlapped

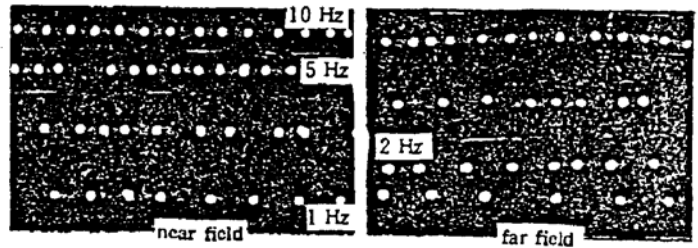


Fig. 7 Laser spots in the near field (0.45 m) and far field (2.5 m) with the repetition rate of 1, 2, 5, 10 Hz

5) 起始腔的稳定性曾被认为是产生受激布里渊散射腔稳定调Q输出的必要条件,但在本实验中观察到当望远镜失调从-3 mm到+3.5 mm时,均可获得较好的输出.而对于平-平腔而言,此时腔经历了从稳定到介稳到非稳的变化过程,可见起始腔稳定并非必要条件.关键问题在于起始腔具有足够的光强以克服受激布里渊散射的阈值.太大的失调会使焦点外移,而在受激布里渊散射池内能量密度不足.因此选择合适的起始腔以增大模体积、提供足够的泵浦能量是十分必要的.

6) 测量了受激布里渊散射-位相共轭腔出射的近远场光斑直径,与图3中的理论计算(在不同 β 值时的相应直径值)作了对比,发现实验值与理论计算中的 $\beta \sim 1$ 的结果最为接近.因此得出结论,当受激布里渊散射池用于谐振腔内时,振幅反射率中的 β 值近似为1.这与国外曾直接在腔内安置半反镜并用CCD测量其腔内往返光束的光斑直径得出 $\beta \approx 1$ 的结论是一致的^[4,5].这一结论可解释为,在受激布里渊散射腔尚未建立时,由初始腔形成的光强较弱,光束边缘部分反射率几近于零,导致由受激布里渊散射池反射后光束光斑缩小较多;但一旦受激布里渊散射-位相共轭腔建立后,光强骤增至一个很大值,此时受激布里渊散射-位相共轭镜的反射率几乎为慢变均匀,这就是为什么在受激布里渊散射-位相共轭腔稳定输出时 β 值当为1而输出的光斑又大大小于YAG棒直径的原因.

3 实用受激布里渊散射共轭腔腔型

图8示出了几种实用腔型:

1) 此种形式的共轭腔在文章^[2]中已有较多叙述,为使 L_{SBS} 与 L 长度匹配,故一般整体腔长较大.

2) 为合并型.这是图4装置的变形.此结构中后反镜与望远镜后片合并而简化了腔结构,这时,相当于图4中的 L_{SBS} 与 L 近似相等的情况.故仍满足腔长匹配条件,在实验中得到了较好的效果.本文中图5及图6中的实验结果是用此结构的腔得到的.

3) 紧贴型腔是把后反镜 M_2 紧贴望远镜,此种结构优点为在后反镜与望远镜之间可插入衰减片,以求得最佳调Q状态,且后反镜调整较方便.

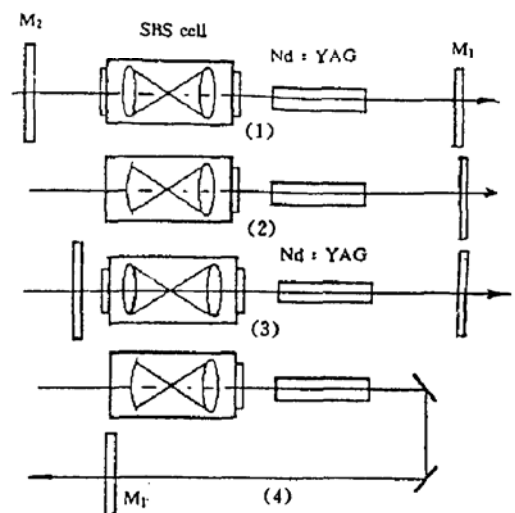


Fig. 8 Four types of SBS-PCR available for application

4) 折迭型是为实用化设计, 整机结构减小而腔长又较长, 使输出能量稳定性增加。

作者对以上四种不同结构的受激布里渊散射-位相共轭镜均进行了实验及测量, 各具优缺点。在经过多次试验测量, 选定了最佳参数之后, 可以采用 2) 型结构固定参数, 即使结构紧凑又具稳定的高质量的激光脉冲输出。

参 考 文 献

- [1] 陈 军, 蒋汝忠, 带受激布里渊散射相位共轭镜的 Nd : YAG 激光器. 光学学报, 1991, 11(8) : 715~719
- [2] 陈 军, 马跃如, 龙 鹰, 用 SF₆ 气体作受激布里渊散射位相共轭镜的激光谐振腔. 光学学报, 1992, 12(12) : 1068~1071
- [3] 卢亚雄, 吕百达, 矩阵光学. 大连理工大学出版社, 1988, 292~297
- [4] H. J. Eichler, R. Menzel, D. Schuman, 10 watt single-rod Nd : YAG laser with SBS-Q-switch mirror. *Proc. of the International Summer School on Nonlinear Optical Phase Conjugation*, Prague, August 26, 1991
- [5] H. J. Eichler, Chen Jun, A. Kummrow *et al.*, Nd : YAG-laser with SBS-Q-switching mirror and repetition rate up to 50 Hz. *Nonlinear Optical Physics*, January 1993

The spatial character of the SBS-phase conjugate laser

CHEN Jun LONG Ying

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 2 November 1992; revised 28 December 1992)

Abstract

The spatial output character of a stimulated Brillouin scattering phase conjugate resonator (SBS-PCR) is analysed by using the ray transfer matrix theory and calculated with the aid of computer program. The profile of the transfer beam with different parameters are given. The experimental results are presented to compare with it. Some important points for design of a SBS-PCR are discussed and the different types of resonator are proposed.

Key words SBS, phase conjugate resonator(PCR).