

用 CH_4 气体 SBBS 作为相位共轭镜的 (Nd,Ce) : YAG 激光谐振腔特性的研究

钟 鸣 韩 凯 李 彤 孙 年 春 杨 社 先

(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要 利用高压 CH_4 气体中的受激布里渊散射作相位共轭反射镜, 组成 (Nd,Ce) : YAG 激光腔, 获得了 62.7 mJ 近 TEM_{00} 模的激光脉冲, 提出了 SBS 相位共轭谐振腔是由不同腔长的谐振腔叠加的新概念。

关键词 受激布里渊散射, 相位共轭谐振腔

利用受激布里渊后向散射 (SBBS) 的相位共轭特性形成的相位共轭谐振腔, 由于其一系列不同于其它谐振腔的特性, 已引起了人们的极大注意。目前的主要工作集中在两个方面: 利用相位共轭反射镜改善输出光束的质量^[1~3]; 利用受激布里渊散射作被动 Q 开关^[4], 因该种被动 Q 开关不受波长限制, 可用于任何波长, 同时还可避免通常的被动 Q 开关损伤阈值低的缺点, 在新波段、窄脉冲、高功率激光器中具有极其重要的应用价值。本文从理论和实验上报道了用高压甲烷气体的 SBBS 作为相位共轭镜的 (Nd,Ce) : YAG 激光器的特性, 比较了染料片调 Q , SBS 自调 Q 及插入衰减片调 Q 方式的优缺点。

1 实验装置及工作原理

实验装置如图 1 所示。其中 M_1 及 M_2 为平面反射镜, 其反射率分别为 36% 和 100%。(Nd,Ce) : YAG 晶体尺寸为 $\phi 5 \times 70$ mm。用泵灯泵浦。SBS 池采用将聚焦、准直透镜及盒体封装在一起的方式, 内充以 11 MPa 的高压 CH_4 气体, 由 M_1, M_2 组成的起始腔形成的激光振荡随着不断放大而使焦点 A 处光强不断增强, 达到 CH_4 的 SBS 阈值时, 由 SBS 的后向反射形成相位共轭反射镜取代起始辅助腔镜 M_2 , 与 M_1 一起构成相位共轭腔, 从而从 M_1 端获得调 Q 激光输出。

2 谐振腔理论

2.1 起始腔

由图 1 可知, 起始腔由 M_1 及 M_2 组成, 内插一望远镜系统。设 M_1 与 f_1 之间距离为 l_1' , M_2 与

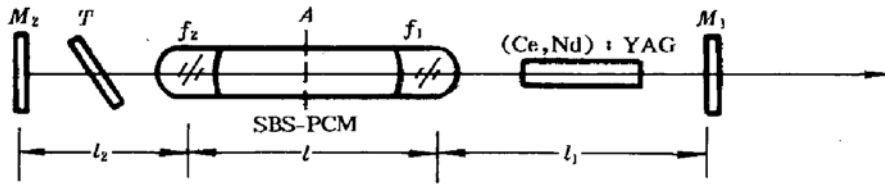


Fig. 1 Scheme of the laser oscillator with SBS cell and auxiliary starting mirror

f_2 之间的距离为 l_2' , 两透镜之间距离为 $l' = f_1 + f_2 + d'$, 则从 M_2 出发到 M_1 的光学传递矩阵为

$$\begin{pmatrix} a' & b' \\ c' & d' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{\Delta'}{f_2}G_1 - \frac{f_1}{f_2} & f_1G_2 + f_2G_1 + \Delta' G_1G_2 \\ \frac{\Delta'}{f_1f_2} & -\frac{\Delta'}{f_1}G_2 - \frac{f_2}{f_1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中

$$G_1 = 1 - \frac{l_1'}{f_1}, \quad G_2 = 1 - \frac{l_2'}{f_2} \quad (2)$$

由此变换矩阵, 不难得出起始腔光场的分布参量, 其中一个比较关键的参量是望远镜系统中焦点处腰斑的大小 ω_0' 及腰斑位置。由 ω_0' 可求出其瑞利长度 $Z_0' = \pi\omega_0'^2/\lambda$, 在我们的实验中, $Z_0' \approx 3 \text{ mm}$ 。显然, 该长度确定了 SBS 产生的范围。

2.2 相位共轭腔

在布里渊池焦点处产生受激布里渊散射后, 形成 SBS 共轭反射镜(SBS-PCM), 其变换矩阵可表述为^[5]

$$\begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{\rho_i} - \frac{i\lambda}{\pi} \left(\frac{1 - \beta^2}{\beta^2 \omega_i^2} \right) & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

图 2 为相位共轭腔示意图, 其中 M_2, f_2 已位于相位共轭腔外。设 SBS-PCM 镜距透镜 f_1 为 $l_2 = f_1 + \Delta$, 其中 Δ 为所取反射面距透镜 f_1 焦点的距离。 f_1 与 M_1 之间的距离为 l_1 , 如图 2 所示。

由 $M_1 \rightarrow$ SBS-PCM 光学变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\Delta/f_1 & \Delta(1 - l_2/f_1) + f_1 \\ -1/f_1 & 1 - l_2/f_1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

包括 M_1 在内的变换矩阵则为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2ad - 1 & 2ab \\ 2cd & 2ad - 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

将此值代入文献[5]的计算结果, 得到 SBS-PCM 处光束参量为

$$\frac{1}{q_i} = \frac{A}{B} - \frac{i\beta}{|B|} \quad (6)$$

$$\rho_i = \frac{2ab}{2ad - 1} = \frac{2\Delta^2 \left(\frac{f_1^2}{\Delta} + f_1 - l_1 \right)}{\frac{2\Delta}{f_1^2} (f_1 - l_1) + 1} \quad (7)$$

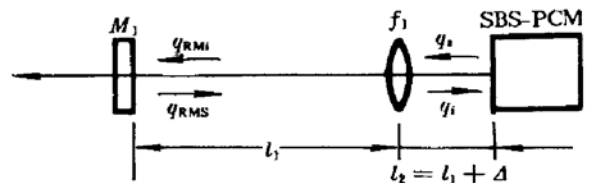


Fig. 2 The schematic diagram of a resonator with the phase-conjugating mirror

$$\omega_i^2 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{(2b|a|)}{\beta} = \begin{cases} \frac{2\lambda\Delta^2}{\pi\beta^2 f_1^2} \left(\frac{f_1^2}{\Delta} + f_1 - l_1 \right) & \Delta > 0 \\ \frac{2\lambda\Delta^2}{\pi\beta^2 f_1^2} \left(-\frac{f_1^2}{\Delta} - f_1 + l_1 \right) & \Delta < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\rho_s = -\rho_i \quad (9)$$

$$\omega_s^2 = \beta^2 \omega_i^2 \quad (10)$$

同理可得 M_1 镜表面光束参量为

$$\rho_{RM_i} = -\frac{1 + \beta^2}{1 - \beta^2} \left(\frac{f_1^2}{\Delta} + f_1 - l_1 \right) \quad (11)$$

$$\omega_{RM_i}^2 = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{b(1 + \beta^2)}{2|a|\beta} = \begin{cases} \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{1 + \beta^2}{2\beta} \left(\frac{f_1^2}{\Delta} + f_1 - l_2 \right) & \Delta > 0 \\ \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{1 + \beta^2}{2\beta} \left(-\frac{f_1^2}{\Delta} - f_1 + l_2 \right) & \Delta < 0 \end{cases} \quad (12)$$

要获得大的基模体积,则 ω_{RM_i} 要尽可能大,其中 $(1 + \beta^2)/2\beta$ 因子在 β 从 60 ~ 100% 的范围内均近似等于 1。而 Δ 是由起始腔中焦点处瑞利长度 Z_0' 决定。在本实验中, $Z_0' \simeq 3$ mm, 则 Δ 从 $-1.5 \sim +1.5$ mm。显然在这样一个区域内都有可能产生受激布里渊后向散射,由(12)式可知, $|\Delta|$ 极小区域对应于 ω_{RM_i} 较大值,故此时充满激活介质,光束衍射极限较小,而 $|\Delta|$ 较大区域对应 ω_{RM_i} 较小值,显然其衍射极限要大一些。激光输出是由不同 Δ 产生的激光的相干叠加,中心部分由于不同 Δ 形成的子腔都有贡献,故输出光斑中心较强,而边缘部分只有 $|\Delta|$ 极小区域所形成的子腔才有贡献,故边缘较弱,衍射极限由 ω_{RM_i} 的较小值决定。

3 实验结果及讨论

在图 1 所示的实验装置上,我们进行了激光输出特性实验。关于调 Q 方式,我们采用了三种方式,其一是利用 SBS 自调 Q ,即取走图 1 中的 T 片;其二是插入衰减片调 Q ,即图 1 中 T 片用 $T_0 = 27\%$ 的衰减片代替;其三是利用 $T_0 = 19\%$ 的染料片与 SBS 共同调 Q 。下面分别叙述其实验结果并进行讨论。

3.1 SBS 自调 Q

将 T 片取走,利用起始谐振腔和 SBS 相位共轭腔 Q 值的变化输出调 Q 脉冲。由图 1 可知,起始腔由 $M_2, f_2, f_1, (\text{Nd,Ce}) : \text{YAG}, M_1$ 构成,设腔内损耗为 δ_i 。相位共轭腔仅由 SBS-PCM, $f_1, (\text{Nd,Ce}) : \text{YAG}$ 和 M_1 构成,设腔内损耗为 δ_{pc} ,显然 $\delta_{pc} < \delta_i$,SBS 调 Q 正是基于这一损耗由 δ_i (高)到 δ_{pc} (低)的变化而引起的。在 610 V/60 μF 的输入能量下,SBS 池充气气压为 75 atm,获得 32 mJ 的 1.06 μm 单脉冲激光输出,总电光效率为 0.29%。泵浦能量略微增加到 640 V/60 μF 时,出现双脉冲甚至三脉冲,并且从触发开始至激光出现的时间间隔 t_1 从 125 ~ 150 μs 之间变化,脉冲之间的间隔 t_2, t_3 亦在 20 ~ 50 μs 之间变化,见图 3。

3.2 插入衰减片

将 $T_0 = 27\%$ 的部分透过片放置 T 处,导致起始腔损耗 δ_i 更大,而 SBS 相位共轭腔损耗 δ_{pc} 是不变的,因此,满足 $\delta_{pc} \ll \delta_i$,故激活介质棒内能积累更多的反转粒子,但起始腔损耗增加,同时激光阈值亦相应地增加。在 840 V/60 μF 的输入能量下,SBS 池充气气压为 75 atm,获得了 47.5 mJ 的激光输出,总电-光效率为 0.2%。脉冲波形如图 4 所示。脉宽 τ 约为 20 ~ 25 ns,近

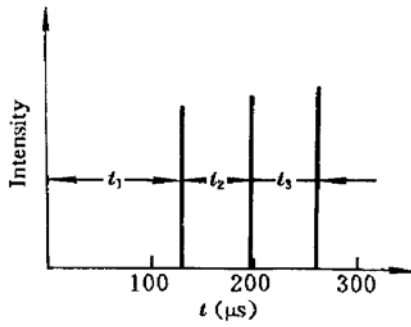


Fig. 3 SBS Q-switching Laser pulses

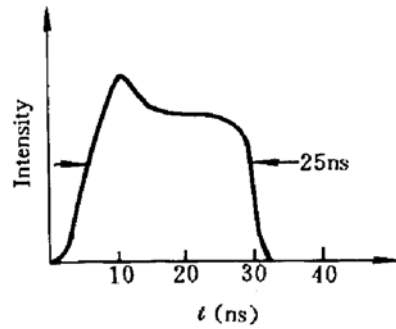


Fig. 4 Temporal profile of laser pulse Q switched by SBS

场光斑直径为 3 mm。但明显可看出激光充满整个孔径(边缘光强较弱,中心极强),这与 2.2 节的理论分析是一致的。从触发到激光发射的时间基本维持在 150 μs 左右(图 3 中的 t₁),且单脉冲坪区较宽。采用阈值法测量了其发散角为 1 mrad。

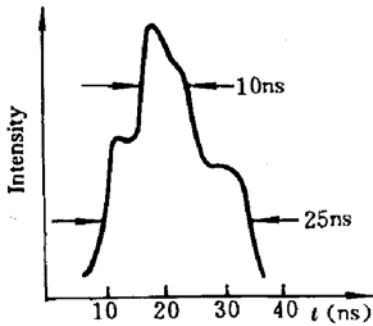


Fig. 5 Temporal profile of Q-switching by BDN dye film and SBS

3.3 染料片与 SBS 共同调 Q

将 T₀ = 19% 的染料片放置 T 处,采用染料片及 SBS 共同调 Q 的方式,在 650 V/60 μF 电输入能量下,SBS 池充气气压为 110 atm,获得了 62.7 mJ 的激光输出,总电-光效率达 0.5%。激光脉冲波形如图 5 所示。在宽度为 25 ns 的 SBS 调 Q 脉冲上叠加一 10 ns 的尖峰脉冲,显然该尖峰脉冲是由染料调 Q 产生的。近场光斑形状比衰减片调 Q 情况要差一些。

3.4 发散角讨论

我们采用阈值法测量了 SBS 相位共轭腔的发散角(全角)为 1 mrad。理论上,可以根据输出镜上光斑的大小求出其衍射极限。

由 2.1 节不难求得 SBS 介质中腰斑大小 ω₀' = 32 μm,其瑞利长度 Z₀' = 3 mm,腰斑位于 f₁ 透镜焦点左边 0.001 mm 处。2.2 节的分析表明,Δ 小值对应输出光束光斑大,Δ 大值对应输出光束光斑小,由 Z₀' 可得出 |Δ| 最大值为 1.5 mm,代入(12)式可得出最小光斑 ω_{RMi.min} = 1.6 mm,由 3.2 节可知,近场光斑直径为 3 mm,则光斑半径为 1.5 mm,因此,实验与理论基本吻合。其衍射极限(全角)为 0.8 mrad,亦与实验值 1 mrad 吻合,从而可知该腔输出光束接近衍射极限。

3.5 对腔长的匹配要求

文献[3]从实验和理论上详细讨论了起始腔长 L 和 SBS 相位共轭腔长 L_{SBS} 在长度上的匹配关系,本实验亦证实了这一点。

4 相位共轭特性的描述

由上述腔结构的分析可知,该腔实际上是准共轭的。当插入的是相位板时,虽然对起始腔有影响,但对相位共轭腔而言,由于 SBBS 的共轭特性,相位板的影响可以消除,对输出影响不大。但当插入会聚或发散透镜时,改变了起始谐振腔结构,对 SBS 腔而言应是无影响的,但对

起始腔而言则影响很大。当 f 过小时将导致起始光场不能产生,因此该腔只是在一定条件下的相位共轭。我们的实验证实了这一点。

参 考 文 献

- 1 杨经国,姜宏伟,杜定旭. 激光谐振腔内受激布里渊散射相位共轭效应的研究. 中国激光, 1991, 18(3): 212~216
- 2 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
- 3 陈 军,马跃如,龙 鹰. 用 SF₆ 气体作 SBS 相位共轭镜的激光谐振腔. 光学学报, 1992, 12(12): 1068~1071
- 4 姚敏言,汤剑鸣. 利用受激布里渊散射 Q 开关的研究. 光学学报, 1992, 12(2): 144~148
- 5 Wang Shaomin, H. Weber. Fundamental modes of stimulated scattering phase-conjugate resonators. *Optica acta*, 1984, 31(9): 971~976

Characteristic Investigation of (Nd,Ce) : YAG Laser Resonator with a Phase Conjugating Mirror Based on SBBS in CH₄ Gas

Zhong Ming Han Kai Li Tong Sun Nianchun Yang Shexian

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, 610041)

Abstract Using the Stimulated Brillouin Back Scattering (SBBS) in high pressure CH₄ gas as a phase conjugating mirror in a (Nd,Ce) : YAG laser resonator, we have got 62.7 mJ near TEM₀₀ mode laser pulses. Also, we have proposed a concept that SBS phase conjugating laser resonator is the result of many overlapped resonators of different lengths.

Key words SBS, phase conjugating resonator