

复合输出镜(Nd,Ce):YAG 拉曼 频移激光器研究

钟 鸣 韩 凯 李 彤

(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘 要 报道了由部分反射凹面镜和辅助平面镜构成的复合输出镜高压 CH_4 气体(Nd,Ce):YAG 拉曼频移激光器的理论和实验研究结果。在 10 J 的输入下, 获得 12 mJ 的拉曼激光输出, 并计算了基频场基模光束参数。

关键词 拉曼激光器, 拉曼频移。

1 引 言

拉曼频移作为一种产生新的激光波长的手段, 已进入实用化的阶段, 早期的外腔拉曼激光器, 主要工作集中在提高泵浦光转换到斯托克斯光的转换效率上。之后, 随着人们对拉曼过程认识的深入, 又发展了内腔拉曼激光器, 由于腔内功率密度高, 因此导致拉曼转换效率增加, 并且光束质量得到改进^[1]。作者曾以高压 CH_4 气体作为拉曼介质, (Nd,Ce):YAG 晶体作为激光介质, 采用内腔拉曼过程, 获得了 0.4% 的电光效率^[2], 达到了可与 $1.06 \mu\text{m}$ 激光器电光效率相比拟的水平。本文报道由部分反射凹面镜和辅助平面镜构成的复合输出镜(Nd,Ce):YAG 激光器, 高压 CH_4 气体, 一阶斯托克斯-拉曼频移的理论和实验研究结果。

2 实验装置及工作原理

实验装置如图 1 所示, 由下列元件构成:

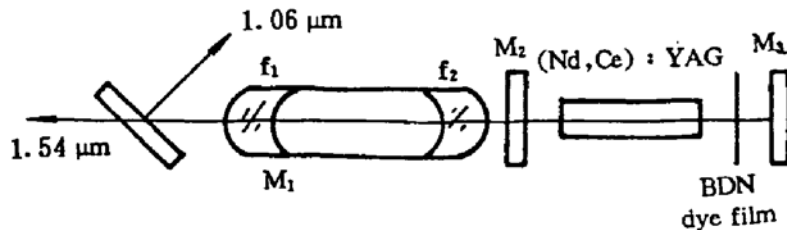


Fig. 1 The schematic diagram of the apparatus

$1.06 \mu\text{m}$ 全反平镜 M_3 , BDN 染料片 ($T_0 = 19\%$), (Nd,Ce):YAG 晶体 ($\Phi 5 \times 72 \text{ mm}$), 辅助输出镜 M_2 (在一阶斯托克斯 $1.54 \mu\text{m}$ 处全反, 对泵浦光 $1.06 \mu\text{m}$ 透过率为 84.5%), 聚

焦透镜 f_2 、准直透镜 f_1 与拉曼盒封装成一体化的拉曼池, 以及 $1.06 \mu\text{m}$ 滤光片 ($1.06 \mu\text{m}$ 全反, $T_{1.54 \mu\text{m}} = 94\%$)。聚焦准直透镜均为凸凹透镜, 准直透镜 f_1 的凹面 M_1 对 $1.54 \mu\text{m}$ 增透, 对 $1.06 \mu\text{m}$ 部分反射, 与辅助输出镜一起构成 $1.06 \mu\text{m}$ 基频谐振腔的复合输出镜。因此从本质上来讲这是一内插透镜的平凹腔。辅助镜既作为 $1.54 \mu\text{m}$ 全反镜^[3], 同时也与凹面镜一起构成 $1.06 \mu\text{m}$ 复合输出端镜, 并起增大复合输出镜的反射率的作用。因此观察到适当调节输入的泵浦能量, 在辅助平镜后无 $1.06 \mu\text{m}$ 激光输出时, 把辅助平面镜与凹面镜作为一个整体输出镜后就产生了 $1.06 \mu\text{m}$ 的振荡。振荡模式显然由部分反射镜 M_1 , 全反镜 M_3 及腔内透镜 f_2 共同决定。当场强达到受激拉曼散射阈值时, 拉曼介质将泵浦光子转换成拉曼频移光子输出 (M_2 的另一个作用是反射后向拉曼光子充当种子光束, 降低拉曼过程的阈值)。从而 $1.06 \mu\text{m}$ 泵浦光与 CH_4 的一阶斯托克斯光混合的激光从复合输出镜端输出。从以上的分析不难看出, 这是一种腔内拉曼过程, 只是对泵浦光不是全封闭的, 仍有 $1.06 \mu\text{m}$ 泵浦光输出。

3 泵浦场参数计算

拉曼频移过程与泵浦场光束参数关系密切。因此先采用 $ABCD$ 矩阵法分析泵浦场光束参数。

图 2 是简化的泵浦场谐振腔光学示意图。

在简化的谐振腔中忽略了 M_2 的影响, 设凹面镜 M_1 曲率半径为 R , 与 f_2 距离为 l_1 , f_2 距全反平镜 M_3 为 l_2 , 则 M_1 、 M_3 的光学变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - l_2/f_2 & (1 - l_2/f_2)l_1 + l_2 \\ -1/f_2 & 1 - l_1/f_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_2 & f_2(1 - G_1G_2) \\ -1/f_2 & G_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 $G_1 = 1 - l_1/f_2$, $G_2 = 1 - l_2/f_2$ 。

3.1 谐振腔的稳定条件

由 M_1 出发, 不难求出往返一周总矩阵为

$$\begin{pmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ad + bc & 2bd \\ 2ac - 2(ad + bc)/R & ad + bc - 4bd/R \end{pmatrix}. \quad (2)$$

在实验中, 取 $l_1 = 147 \text{ mm}$, $l_2 = 242 \text{ mm}$, $R = 82.86 \text{ mm}$, $f_2 = 109.7 \text{ mm}$ 。因此根据谐振腔稳定条件并将以上数据代入得:

$$(A' + D')/2 = 2ad - 1 - (2bd)/R = 0.3512 < 1, \quad (3)$$

故泵浦场谐振腔工作在稳定区域。

3.2 M_3 处泵浦场光束参数

包含凹面镜及腔内光学元件的光学变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2dG - 1 & 2bG \\ 2d(dG - 1)/b & 2dG - 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中 $G = a - b/R$ 。由图 3 可见, 在 M_3 的表面, 有:

$$1/q_{i_3} = (C + D/q_{r_3})/(A + B/q_{r_3}), \quad 1/q_{r_3} = 1/q_{i_3}. \quad (5)$$

由(5)式中两个方程求解后得

$$1/q_{i_3} = -\sqrt{C/|B|} i, \quad \rho_{i_3} = \infty, \quad \omega_{i_3}^2 = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{|B|/c}. \quad (6)$$



Fig. 2 Optical schematic layout of the pump resonator

3.3 凹面镜 M_1 处泵浦场光束参数

由图 4 可以得到:

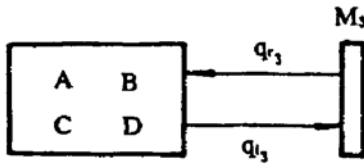


Fig. 3 The schematic resonator

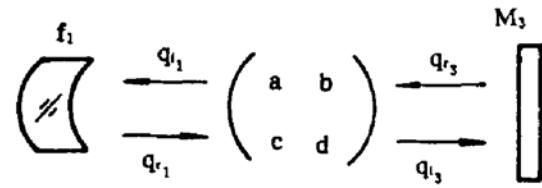


Fig. 4 The schematic resonator

$$\frac{1}{q_{i_1}} = \frac{c + a/q_{r_3}}{d + b/q_{r_3}} = \frac{cd + ab(C/|B|) - \sqrt{C/|B|}i}{d^2 + b^2(C/|B|)} = \frac{1}{R} - \frac{G}{d} \sqrt{C/|B|}i \quad (7)$$

$$\frac{1}{q_{r_1}} = \frac{c - a/q_{i_3}}{-d + b/q_{i_3}} = -\frac{cd + ab(C/|B|) - \sqrt{C/|B|}i}{d^2 + b^2C/|B|} = -\frac{1}{R} - \frac{G}{d} \sqrt{C/|B|}i \quad (8)$$

故得: $\rho_{i_1} = R, \quad \rho_{r_1} = -R, \quad \omega_{i_1}^2, \omega_{r_1}^2 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{d}{G} \sqrt{|B|/C}$ (9)

3.4 拉曼介质中泵浦场腰斑位置及大小

设距 M_1, l_0 处是泵浦场光束束腰位置。则

$$\frac{1}{q_0} = \frac{1/q_{r_1}}{1 + l_0/q_{r_1}} = \frac{-(1/R)(1 - l_0/R) + (l_0G^2/d^2)C/|B| - (G/d) \sqrt{C/|B|}i}{(1 - l_0/R)^2 + [(l_0G/d) \sqrt{C/|B|}]^2} \quad (10)$$

令实部为 0 得: $l_0 = db/(2ad - 1 - acR),$ (11)

腰斑半径为: $\omega_0^2 = (\lambda/\pi) \cdot l_0 \sqrt{R/l_0 - 1}.$ (13)

表 1 是将数据代入后计算所得泵浦场在 M_1, M_3 及拉曼介质中腰斑的光束参数值。

Table 1 Pump field beam parameters

	distance from M_1	radius of curvature	spot radius calculation value
M_1	0	$\rho_{i_1} = R, \rho_{r_1} = -R$	$\omega_{i_1} = \omega_{r_1} = 0.13 \text{ mm}$
beam waist in Raman medium	$l_0 = 20.17 \text{ mm}$	$\rho_0 \rightarrow \infty$	$\omega_0 = 0.11 \text{ mm}$
M_3	$l_1 + l_2$	$\rho_{i_3} = \rho_{r_3} \rightarrow \infty$	$\omega_{i_3} = \omega_{r_3} = 0.30 \text{ mm}$

以上分析了泵浦场的光束参数。在高斯光束聚焦泵浦拉曼介质的情况下, 可以求出斯托克斯的光束参数^[4]。

4 实验结果及讨论

4.1 拉曼激光输出实验

拉曼盒中 CH_4 气体充气气压 9.0 MPa, 在 10 J 的电输入下, 获得了 12 mJ 的拉曼激光输出, 测得此时 1.06 μm 剩余泵浦量为 21 mJ。在此泵浦输入下, 辅助镜后无 1.06 μm 激光输出。用像纸接收拉曼激光近场光斑, 测得该光斑直径为 0.59 mm。

4.2 复合镜 1.06 μm 激光输出

将拉曼盒中 CH_4 气体放空, 测试复合输出镜的 1.06 μm 激光输出特性。在 12.3 J 的泵浦水平下, 此时在辅助镜 M_2 后仍无输出, 而复合输出镜后的输出为 46.0 mJ。

4.3 讨 论

从表 1 和实验结果可以看到,该激光器在输出端光斑小,光能量集中,因此膜片损伤严重。在实验中,凹面输出腔镜曾采用 $1.54\ \mu\text{m}$ 高透, $1.06\ \mu\text{m}$ 全反的介质膜,当激光介质的泵浦能量降至 $8.7\ \text{J}$ 时,输出仍有 $12\ \text{mJ}$,经过数次运行后,膜片损坏,实验结果不能重复。

拉曼激光输出实验中, $1.06\ \mu\text{m}$ 剩余泵浦光和拉曼激光能量之和为 $33\ \text{mJ}$ 。而不充拉曼介质时,采用复合输出镜, $1.06\ \mu\text{m}$ 输出为 $46.0\ \text{mJ}$ 显然,差值是由 CH_4 介质中的损耗所引起的。但是,从阈值角度来看,拉曼介质的引入反而使阈值降低。因此,拉曼介质在其中究竟起何作用,是下一步应该继续探讨的问题。

结 论 本文从理论和实验上描述了一种新的拉曼激光器,其机理既不同于外腔拉曼激光器,亦不同于内腔拉曼激光器。显然,通过进一步的优化设计,例如根据(6)式和(9)式,适当选择 l_1 、 l_2 、 R 和 f_2 ,使得 ω_1 、 ω_3 增大,则损伤问题将得到较好的解决,从而能进一步改善实验结果。

陈培基,金锋两同志在实验中曾给予较多的帮助和进行过有益的讨论,谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] R. M. Ogorkiewicz, Eye-safe neodymium lasers. *International Defense Review*, 1990, (2) : 174~175
- [2] M. Zhong, K. Han, F. Jin *et al.*, Influences of lateral magnification and optical interval on the output of $1.54\ \mu\text{m}$ intracavity Raman laser. *Proc. SPIE*, 1992, 1979 : 190~192
- [3] E. Gregor, D. E. Nieuwsma, R. D. Stultz, 20 Hz eyesafe laser rangefinder for air defense. *Proc. SPIE*, 1990, 1207 : 124~135
- [4] M. C. Ibson, *et al.*, Analysis of Raman gain for focussed Gaussian pump beams. *Appl. Phys.*, 1988, B45(1) : 37~44

Studies of (Nd,Ce) : YAG Raman Shifting Laser with Compound Output Mirror

Zhong Ming Han Kai Li Tong

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041)

(Received February 26 1994; revised 11 April 1994)

Abstract The theoretical and experimental studies of (Nd,Ce) : YAG Raman shifting laser in high pressure CH_4 gas with compound output mirror composed of a partial reflective concave and a auxiliary plane mirror are reported in this paper. We have got $12\ \text{mJ}$ pulse Raman laser in $10\ \text{J}$ input, and calculated the fundamental mode beam parameters of the fundamental frequency field.

Key words Raman laser, Raman shifting.