

内腔拉曼频移激光器输出光束参量计算

钟 鸣 左 研 韩 凯 孙 年 春 张 翼 樊 红 英

(西南技术物理研究所, 成都 610041)

王 骥 马 祖 光 王 月 珠

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 从理论上讨论了内腔拉曼频移激光器输出光束的腰斑大小和位置。首先从矩阵光学出发求出拉曼介质中抽运基频场的光束参量; 然后根据 Ibison 的匹配模理论求出拉曼介质中的斯托克斯参量; 最后通过出射光学系统传递矩阵的变换, 求出出射拉曼频移光束的参量。为拉曼频移激光器的设计提供了依据。

关键词: 非线性光学; 拉曼频移激光光束; 矩阵光学

中图分类号: O473.3 文献标识码: A

1 引 言

拉曼频移激光技术作为一种获取新的激光波长的工程实用化手段, 已引起人们的广泛注意。1986 年, 美国休斯飞机公司利用高压 CH_4 气体研制成利用拉曼频移技术的 $1.54 \mu\text{m}$ 人眼安全激光测距机^[1]; 1991 年, 该公司进一步发展拉曼频移技术, 研制成重复频率达 15 Hz 拉曼频移激光测距机并用于光电传感器跟踪系统^[2], 国内于 1990 年完成了拉曼频移原理样机研制^[3]。尽管拉曼频移激光技术已进入应用阶段, 但有关拉曼频移激光光束的参量特性、光束质量的评价仍需研究。在工程应用中, 拉曼频移激光器的设计尚不够深入, 所使用的仍是按几何光学设计的、沿袭 $1.06 \mu\text{m}$ 激光测距机的发射天线, 往往难以达到理想的效果。

我们通过多年的拉曼激光技术研究及工程经验发现, 拉曼输出光束是一种典型的高斯光束, 如在拉曼激光器的设计中, 能用某种方法对其输出光束参量进行先期设计, 根据设计值计算光学系统, 对改进拉曼激光器输出光束的质量将大有益处, 对发射天线的设计亦大有裨益。

本文从理论上研究了内腔拉曼频移激光器输出光束参量的计算方法及结果。从矩阵光学出发, 根据内腔拉曼激光器的工作原理, 首先是基频场在谐振腔内振荡, 当拉曼介质中基频场强度达到受激拉

曼散射阈值时, 基频场光子中有一部分被频移成斯托克斯光子, 其基频场和斯托克斯场参量的关系, Ibison 等已进行了深入的研究^[4]。最后, 斯托克斯光经准直透镜准直后输出。根据这一原理, 我们可以得出求解拉曼频移输出光束参量的三个步骤: 由腔内光学元件的传输矩阵求解出抽运基频场的光束参量。然后由这些参量根据 Ibison 的匹配模理论求出斯托克斯场参量。对这些斯托克斯场参量进行高斯光学传输变换就能求出出射斯托克斯光束的参量。

2 抽运基频场的光束参量计算

对于一个内腔拉曼激光器, 其基频谐振腔可以简化成一个内插望远镜的望远镜式谐振腔, 因此根据腔内光学元件的传输矩阵求出抽运基频场的光束参量。图 1 是内腔拉曼激光器的简化示意图。

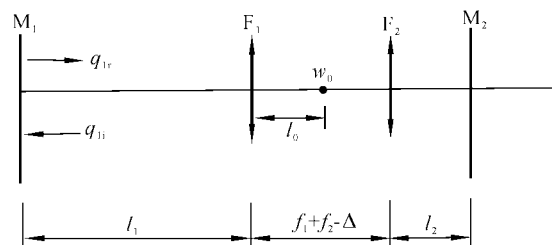


Fig. 1 Hinting scheme of an intracavity Raman laser

由图 1 可知, 基频谐振腔由腔镜 M_1 、 M_2 和透镜 F_1 、 F_2 组成, 设 M_1 与 F_1 之间距离为 l_1 , M_2 与 F_2 之间的距离为 l_2 , 两透镜之间距离 $l = f_1 + f_2 - \Delta$, 其中 Δ 为两透镜焦点之间的距离, 则从 M_1 出发到

E-mail: switp@xiwu.net

收稿日期: 2001-12-25; 收到修改稿日期: 2002-06-10

M_2 的光学传递矩阵为

$$\mathbf{T}_{M_1, M_2} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta}{f_1} G_2 - \frac{f_2}{f_1} & f_1 G_2 + f_2 G_1 - \Delta G_1 G_2 \\ -\frac{\Delta}{f_1 f_2} & \frac{\Delta}{f_2} G_1 - \frac{f_1}{f_2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, $G_1 = 1 - l_1/f_1$, $G_2 = 1 - l_2/f_2$. (2)

设 M_1 镜表面入射光束参量为 q_{1i} , 反射光束参量 q_{1r} , 则由自洽关系可知, q_{1i} 经 M_1 反射后应为 q_{1r} , 而 q_{1r} 经 M_1 到 M_2 传输矩阵传递、 M_2 反射和 M_2 到 M_1 传递矩阵传递后应为 q_{1i} , 从而得到

$$q_{1r} = q_{1i}, \quad (3)$$

$$q_{1i} = (Aq_{1r} + B)/(Cq_{1r} + D), \quad (4)$$

其中 A, B, C, D 应满足

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = T_{M_1} T_{M_2, M_1} T_{M_2} T_{M_1, M_2} = \begin{bmatrix} ad + bc & 2db \\ 2ac & ad + bc \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由(5)式可知其主对角元相等(即 $A = D$), 因此求解(3)式、(4)式可得

$$q_{1i} = \sqrt{\frac{B}{C}} = \sqrt{\frac{db}{ac}} = i \sqrt{-\frac{db}{ac}}, \quad (6)$$

$$q_{1r} = i \sqrt{-\frac{db}{ac}}, \quad (7)$$

下面求解拉曼介质中基频场腰斑位置及大小, 设拉曼介质中基频场腰斑为 w_0 距 F_1 为 l_0 , 则由 M_1 到 w_0 的传播矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} 1 - l_0/f_1 & l_1 + l_0 G_1 \\ -1/f_1 & G_1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

显然有 q_{1r} 经 T 传播矩阵后变成 q_0 , 由 $ABCD$ 定律有:

$$\frac{1}{q_0} = \frac{-1/f_1 + G_1/q_{1r}}{1 - l_0/f_1 + (l_1 + l_0 G_1)/q_{1r}}, \quad (9)$$

利用 $\frac{1}{q_{1r}} = -i \frac{\lambda}{\pi w_1^2}$, (9) 式右部分子与分母同乘以

$$\left[1 - \frac{l_0}{f_1} + i(l_1 + l_0 G_1) \frac{\lambda}{\pi w_1^2}\right], \text{ 可得}$$

$$\frac{1}{q_0} = \frac{-\frac{1}{f_1} \left(1 - \frac{l_0}{f_1}\right) + G_1 (l_1 + l_0 G_1) \left(\frac{\lambda}{\pi w_1^2}\right)^2 - i \frac{\lambda}{\pi w_1^2} \left(\frac{l_1}{f_1} + G_1\right)}{\left(1 - \frac{l_0}{f_1}\right)^2 + (l_1 + l_0 G_1)^2 \left(\frac{\lambda}{\pi w_1^2}\right)^2}, \quad (10)$$

显然 w_0 所在的 l_0 必须使 $1/q_0$ 的实部为 0, 从而有

$$\frac{1}{f_1} - \left(\frac{\lambda}{\pi w_1^2}\right)^2 G_1 l_1 = \left[\frac{1}{f_1^2} + \left(\frac{\lambda}{\pi w_1^2}\right)^2 G_1^2\right] l_0, \quad (11)$$

利用 $\frac{\lambda}{\pi w_1^2} = \sqrt{-\frac{ac}{db}}$, 得

$$\frac{1}{f_1} + \frac{ac}{db} G_1 l_1 = \left[\frac{1}{f_1^2} - \frac{ac}{db} G_1^2\right] l_0. \quad (12)$$

由(12)式可求得 l_0 , 原则上将 l_0 值代入(10)式虚部可求得 w_0 . 下面给出数值例子.

例: $l_1 = 150 \text{ mm}, l_2 = 137 \text{ mm},$

$f_1 = 53.6 \text{ mm}, f_2 = 41.7 \text{ mm},$

$G_1 = 1 - l_1/f_1 = -1.80,$

$G_2 = 1 - l_2/f_2 = -2.29.$

设 $\Delta = -1 \text{ mm},$

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.74 & -193.68 \\ 4.474 \times 10^{-4} & -1.24 \end{bmatrix},$$

$$w_1^2 = \frac{\lambda}{\pi} \left(\frac{ac}{bd}\right)^{-1/2}; \quad w_1 \approx 0.29 \text{ mm},$$

由(12)式求解得 $l_0 = 54.60 \text{ mm}$. 显然 w_0 位于 f_1 焦点右边 1 mm , 亦即 f_2 的物方焦点处, 将 l_0 值代入(10)式虚部可求出 $w_0 \approx 4.29 \times 10^{-2} \text{ mm}$.

3 聚焦高斯光束抽运产生的斯托克斯场光束参量

Ibison 等在文献[4]中, 对聚焦高斯光束抽运所产生的拉曼斯托克斯场进行了详细的分析, 提出了匹配模式理论. 运用该理论可以根据聚焦的抽运高斯光束参量求出斯托克斯场光束参量.

首先简述一下 Ibison 的匹配模式理论.

我们将媒质中的斯托克斯场视为高斯光束, 其参量的选取将使得拉格朗日函数极小,

$$\delta \left\{ \iiint \iiint dx dy dz dt \text{lim}(E, H) \right\} = 0. \quad (13)$$

设斯托克斯场的形式为

$$\delta(r) = A(z) \exp[-iQ(z)r^2/2]^*, \quad (14)$$

将(14)式代入(13)式并进行处理可得一组归一化的方程:

$$q^2 + q' + \frac{ip_p}{2k^2} \frac{1}{[1 + \xi^2 - (k\text{Im}\{q\})^{-1}]^2} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{a'}{a} = \frac{|q|^2 + q'}{2i\text{Im}\{q\}} + \frac{p_p}{4k} \cdot \frac{1}{1 + \xi^2 - (k\text{Im}\{q\})^{-1}}, \quad (16)$$

此处 $Q(z)$ 的定义与国内文献常用的 $q(z)$ 的定义的

关系为

$$Q(z) = 1/q(z),$$

其中 p_p 为归一化的抽运功率, $k = k_s/k_p$ 是斯托克斯场与抽运场波数之比. $q(\xi)$ 和 $a(\xi)$ 分别为新的归一化的复光束参量和振幅, ξ 为新的纵向变量,

$$q(\xi) = w_{p0}^2 Q(z)/(2k); a(\xi) = A(z), \quad (17)$$

$$\xi = 2z/(k_p w_{p0}^2). \quad (18)$$

设(13)式解的形式为(其中 α, β 为实数):

$$q(\xi) = \frac{\alpha - i\beta + c_1 \xi}{1 + \xi^2}, \quad (19)$$

可得

$$c_1 = 1, \quad (20)$$

$$\alpha = (\beta^2 - 1)^{1/2}, \quad (21)$$

$$\beta p_p = 4(\beta^2 - 1)^{1/2}(1 + k\beta)^2. \quad (22)$$

从而

$$q(\xi) = [(\beta^2 - 1)^{1/2} + \xi - i\beta]/(1 + \xi^2), \quad (23)$$

因此

$$R_s(z) = \frac{k_p w_{p0}^2 (1 + \xi^2)}{2[\xi + (\beta^2 - 1)^{1/2}]}, \quad (24)$$

$$w_s^2 = w_p^2(z)/(k\beta). \quad (25)$$

图 2 是抽运光和斯托克斯光在增益介质中光斑大小示意图。

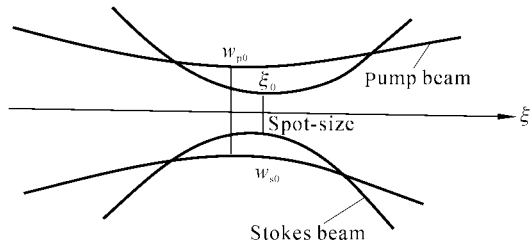


Fig. 2 Pump and Stokes beam in a gain medium

从上所述可知, 如果已知 k, β 以及 $w_p(z)$, 就可以根据(25)式求出 $w_s(z)$ 。

4 出射斯托克斯光束(拉曼光束)参量计算

由图 2 可知, w_{s0} 离 w_{p0} 有一距离 ξ_0 , 拉曼介质中的斯托克斯场经准直透镜变换后输出. 设 w_{p0} 离 F_2 物方焦点有一距离 Δ' , 如图 3 所示, 则 $S_0 = \Delta' + f_2$, 经过准直透镜变换后的 S_i 可由成像公式求出^[5]

$$\frac{1}{S_i} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{S_0} \frac{1}{1 + Z_{s0}^2/[S_0(S_0 - f_2)]}, \quad (26)$$

即

$$\frac{1}{S_i} = \frac{1}{f_2} - \frac{\Delta'}{\Delta'(\Delta' + f_2) + Z_{s0}^2}. \quad (27)$$

因为 $\Delta' \ll f_2$,

$$\text{所以 } \frac{1}{S_i} = \frac{1}{f_2} - \frac{\Delta'}{\Delta' f_2 + Z_{s0}^2},$$

$$S_i = f_2 + \frac{\Delta' f_2}{Z_{s0}^2}, \quad (28)$$

其中 $Z_{s0}^2 = \frac{\pi}{\lambda} w_{s0}^2$.

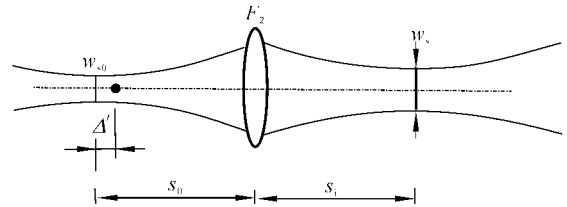


Fig. 3 Stokes beam after collimation lens

根据物像比例公式可求得射斯托克斯光束腰斑:

$$w_s = w_{s0} \frac{f_2}{(Z_{s0}^2 + \Delta'^2)^{1/2}}, \quad (29)$$

由(26)式可直接看出, 当 $\Delta = 0$ 时, $S_i = f_2$, 即斯托克斯出射光束腰斑位于准直透镜像方焦平面上, 且由(29)式可得

$$w_s = s_{s0} f_2 / Z_{s0}.$$

根据前面的数值例子, 我们对 w_s 进行估算:

前已求得 $w_{p0} = 4.29 \times 10^{-2}$ mm, 假如 w_{s0} 取为 4×10^{-2} mm, 则

$$Z_{s0} = \frac{\pi}{\lambda} w_{s0}^2 = 4.7 \text{ mm}, \quad w_s = 0.35 \text{ mm}.$$

该结果是对单模而言, 多模情况显然大于该值。

根据以上理论, 我们设计了一台工程用微型拉曼激光器, 激光器能量 $E \geq 6$ mJ, 光斑尺寸为 1 mm, 脉宽 $\tau = 8$ ns, 激光束散 $\theta \leq 8.5$ mrad, 工作寿命不小于 30000 次, 工作温度 $-43^\circ\text{C} \sim 55^\circ\text{C}$ 。

有关腔镜对拉曼激光输出的影响, 我们已在有关文献中作了报道^[6]。

结束语 本文从理论上讨论了内腔拉曼激光器斯托克斯出射光束参量的求解方法和步骤, 它为优化内腔拉曼激光器的设计提供了依据, 这些结果将在拉曼激光器设计中对改进内腔拉曼激光器输出光束质量和避免腔内元件损伤有指导意义。

本文用图由白红女士绘制, 谨致谢意。

参 考 文 献

- 1 Nickkols R W, Ng W K. Raman shifted Nd:YAG class I eye-safe laser development. *Proc. SPIE*, 1986, **610**:92~98
- 2 Strultz R D, Gregor D E M. Eyesafe high pulse rate laser

- progress at Hughes. *Proc. SPIE*, 1991, **1419**:64~74
- 3 Zhong Ming *et al.*. The comparison of 1.54 μm and 1.06 μm rangfinder in the outdoor experiment. *Laser Technique* (激光技术), 1990, **14**(6):25 (in Chinese)
- 4 Jbison M G, Hanna D C. Analysis of Raman gain focused Gaussian pump beams. *Appl. Phys. (B)*, 1988, **45**(1):37
- 5 Lü Baida. *Laser Optics* (激光光学). Chengdu: Sichuan University Press, 1992. p. 85
- 6 Zhong Ming, Han Kai, Li Tong. Studies of (Nd,Ce):YAG Raman shifting laser with compound output mirror. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15**(4):509~512

The Calculation of Intracavity Raman-Shift Laser Beam Parameters

Zhong Ming Zuo Yan Han Kai Sun Nianchun Zhang Yi Fan Hongying
(South-West Institute of Technical Physics, Chengdu 610041)

Wang Qi Ma Zuguang Wang Yuezhu
(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)
(Received 25 December 2001; revised 10 June 2002)

Abstract: The calculation of the beam waist diameter and its position of an intracavity Raman-shift laser is discussed. We use optical transformation matrix and figure out the general pump field parameters in the Raman gain medium. And then, according to Jbison's "matched mode" theory, the Stokes field parameters in the Raman active medium are calculated. By using the optical transformation matrix again, the Raman-shifted beam (emitted from the optical system) parameters can be calculated. The results provide a new base for Raman-shifted laser design.

Key words: nonlinear optics; Raman-shifted laser beam; matrix optics