

受激拉曼散射中的二阶量子关联

徐剑秋 楼祺洪 宁东 薛绍林

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 利用全量子理论和多模受激拉曼散射模型, 研究了拉曼放大中, 考虑泵浦光耗散时, 斯托克斯光和泵浦光二阶量子关联函数随相互作用距离变化的特性, 在不计及色散的影响时, 斯托克斯光和泵浦光的二阶量子关联函数的变化主要取决于输入斯托克斯光和泵浦光的光强比。在极限情况下, 本文的计算结果与拉曼产生中的计算结果和经典耦合波理论的计算结果相符合。

关键词 多模模型, 二阶量子关联函数, 受激拉曼散射。

1 引 言

受激拉曼散射不论在理论上还是在实验上一直受到人们的广泛重视, 受激拉曼散射作为产生新波段的相干光、高分辨拉曼光谱及压缩脉冲的重要手段, 显示出巨大的应用价值。而近年来, 受激拉曼散射用于光束净化, 激光组束^[1]来改善激光束的质量, 在激光器技术上尤其是准分子激光器上取得了良好的结果。尽管如此, 人们对受激拉曼散射的认识还不是十分完善, 其中在考虑泵浦光耗散的前提下, 输入光和输出光之间的内在关联仍是一个有待研究的问题。对于拉曼组束和拉曼净化, 了解输入光和输出光之间的内在关联是设计最优的组束方案和净化方案的先决条件, 输入信号光和泵浦光之间的二阶关联不仅影响拉曼放大的增益, 而且在波导组束中也起着重要的作用^[2]。从受激拉曼散射开始出现, 输入信号和泵浦光之间的二阶关联就引起了人们的关注^[3]。1986年 Lombardi 等人测量了拉曼放大中泵浦光和斯托克斯光之间的二阶关联^[4], 随后 Westling 和 Raymer 从实验上和理论上研究了拉曼产生中泵浦光和斯托克斯光之间的二阶关联^[5]。1995年, 作者所在的实验小组利用了泵浦光和斯托克斯光之间的二阶关联理论研究了波导中宽带组束的内在机制^[2]。

为研究宽带受激拉曼散射, 人们建立了多种模型, 包括相散模型, 混沌模型和多模模型, 对于大多数的泵浦光为脉冲的情况下, 宜采用多模模型, 同时在拉曼放大中也不能忽略泵浦光的耗散。为此, 本文采用全量子理论和多模模型研究了拉曼放大中的二阶量子关联。

2 受激拉曼散射的多模模型

均为多模的泵浦光和斯托克斯光可以表示为,

$$\epsilon_p^- = \sum_n^N (A_{0n}\omega)^{1/2} a_{ip}^+ \exp[-i(n\sigma + \omega_p t - \mathbf{k}_p \cdot \mathbf{r})]$$

$$\epsilon_s^- = \sum_m^M (A_0 \omega)^{1/2} a_{js}^+ \exp[-i(m\sigma + \omega t - \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r})] \quad (1)$$

其中下标 p 和 s 分别表示泵浦光和斯托克斯光, N 和 M 分别为各自的模式数, $A_0 = i\hbar/2\mu_0$, ω_p 和 ω_s 为泵浦光和斯托克斯光的中心频率, σ 为模式间距, $\omega_i = i\sigma + \omega_{p(s)}$, 当激光线宽和激光中心频率相比很小时, 可用中心频率替代 ω_i , $a_{ip(s)}^+$ 为 i 模的产生算符。

当模式间距远远大于拉曼介质的跃迁线宽和各模式线宽时, 即 $\sigma \gg \Gamma, \Gamma_n$ 时, 可认为泵浦光和斯托克斯光成对相互作用(彼此相差一个拉曼频移), 模式之间不存在相互作用。令 $E_{p(s)}^-$ 为 $\epsilon_{p(s)}^-$ 的慢变幅振幅, 则

$$\begin{aligned} \epsilon_p^- &= E_p^- \exp[-i(\omega_p t - \mathbf{k}_p \cdot \mathbf{r})] \\ \epsilon_s^- &= E_s^- \exp[-i(\omega_s t - \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{r})] \end{aligned} \quad (2)$$

采用坐标 $(z, \tau = t - z/v)$, 在旋转波近似和电偶极近似下, 不考虑色散, 可得受激拉曼散射的海森堡(Heisenberg)方程为^[6],

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} E_s^- &= -iK_2 E_p^- Q^+ \\ \frac{\partial}{\partial z} E_p^- &= -iK_2 \frac{\omega_p}{\omega_s} E_s^- Q \\ \frac{\partial}{\partial \tau} Q^+ &= -\Gamma Q^+ + iK_1 E_p^+ E_s^- \end{aligned} \quad (3)$$

其中 Q^+ 为原子跃迁算符, K_1, K_2 为拉曼介质的耦合系数, Γ 为由碰撞引起的弛豫系数。

(1) 式和(3)式就是本文所采用的多模模型与进行计算的基本公式。

3 二阶量子关联函数

定义二阶量子关联函数为,

$$g^{(2)}(z, \tau) = \frac{\langle \dot{E}_p^- E_s^- E_s^+ E_p^+ \rangle}{\langle \dot{E}_p^- E_p^+ \rangle \langle \dot{E}_s^- E_s^+ \rangle} \quad (4)$$

若考虑到 $I = \langle \dot{E}^- E^+ \rangle$, 则二阶量子关联函数可写为,

$$g^{(2)} = \frac{G}{I_p I_s} \quad (5)$$

式中

$$G = \langle \dot{E}_p^- E_s^- E_s^+ E_p^+ \rangle$$

在脉冲宽度远大于拉曼介质的弛豫时, 可令(3)式中 $\partial Q^+ / \partial \tau = 0$, 那么得到,

$$Q^+ = iK_1 \Gamma^{-1} E_p^+ E_s^- \quad (6)$$

对(3)式中的第一式左乘 E_s^+ 并加上其共轭右乘 E_s^- , 并认为输入光为相干态, 则得,

$$\frac{\partial}{\partial z} I_s = \mathcal{Y} G \quad (7)$$

其中 $\mathcal{Y} = 2\text{Re}(k_1 k_2) \Gamma^{-1}$, 由(3)式中第二式同样可得,

$$\frac{\partial}{\partial z} I_p = -\mathcal{Y} \frac{\omega_p}{\omega_s} G \quad (8)$$

由(7)式和(8)式可以看出, 泵浦光和斯托克斯光满足能量守恒,

$$W_0 = I_p + \frac{\omega_p}{\omega_s} I_s = I_{p0} + \frac{\omega_p}{\omega_s} I_{s0} \quad (9)$$

I_{p0} 、 I_{s0} 分别为 $z = 0$ 处泵浦光和斯托克斯光的光强。将(6)式代入(3)式中,并考虑对易关系 $[E^+, E^-] = NA_0\omega$ (对易关系由 E^- 、 E^+ 的展开式(1)和(2)、并考虑模式之间不存在相互作用而直接计算得到), N 为模式数, ω 为光场的中心频率, 可得,

$$\Theta = \langle \hat{Q}^+ \hat{Q} \rangle = \gamma_1(G + NA_0\omega I_s) \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \Theta = \gamma(W_0 - 2\frac{\omega_p}{\omega_s} I_s) \Theta \quad (11)$$

其中 $\gamma_1 = |k_1|^2 \Gamma^{-2}$, 推导上式时利用了(9)式的能量守恒关系。在经典耦合波理论中^[3], 当 $g^{(2)} = 0$ 时, I_s 的增益为零。而在量子理论中, 注意(10)式中, 由对易关系得到的第二项, 当 $G = 0$, 即 $g^{(2)} = 0$ 时, 该项不为零, 由此得到 I_s 的增益的初始值。

(7)、(8)、(10)和(11)式即为计算受激拉曼散射二阶量子关联函数的方程, 从以上四式解得 I_p 、 I_s 和 G , 代入(5)式即可求得泵浦光和斯托克斯光的二阶量子关联函数。

4 计算结果与讨论

受激拉曼散射的二阶量子关联函数的计算结果如图 1 所示, 曲线 n_1 、 n_2 、 n_3 分别为泵浦光和输入斯托克斯光光强比为 1000:1, 100:1, 10:1 时二阶量子关联函数随传播距离的变化曲线, 可见当斯托克斯光的光强在总光强中的比值逐渐减少时, 斯托克斯光和泵浦光由不完全二阶相关到完全二阶相关的距离随之减小, 当该比值等于零时, 退化为由自发辐射中拉曼散射产生斯托克斯光的问题, 其结果与 Westling 的结论相同^[4], 即通过拉曼散射产生的斯托克斯光在任何位置都与泵浦光完全二阶相关。该结论也与有关实验相符合。当斯托克斯光的光强在总光强中占到一定比例后, 直到泵浦光耗散尽时, 斯托克斯光和泵浦光都不会达到完全的二阶相关, 这与经典处理中考虑到泵浦光耗散时, 得出的结论完全相同。需要指出的是, 在不考虑泵浦光的耗散时, 斯托克斯光和泵浦光最终会达到完全的二阶相关, 同时斯托克斯光将无限增加^[5], 这显然不符合实际情况, 因此在强泵浦和高增益时, 应考虑泵浦光耗散对受激拉曼散射的影响。

当不考虑色散时, 除了在 $g^{(2)} = 0$ 附近, 多模与单模的情形完全相似, 在 $g^{(2)} = 0$ 附近, 多模比单模更容易获得增益, 也更容易获得与泵浦光的二阶相关性。若计及色散的影响, 多模比单模需要较多的作用时间和作用距离来达到斯托克斯光与泵浦光的完全二阶相关, 但在高增益时, 色散的影响可以忽略。

结 语 本文采用全量子理论和多模模型, 研究了拉曼放大中, 考虑到泵浦光耗散时, 泵浦光和斯托克斯光的二阶相关函数随相互作用距离的变化情况, 指出不完全二阶相关的泵浦光和输入的斯托克斯光在相互作用一段距离后, 其二阶相关函数会渐趋于 1, 而从不完全二阶相关到完全二阶相关的距离由输入的斯托克斯光和泵浦光的光强比决定, 光强比越大, 所需的作用距离越长, 当该比值大于一定值时, 斯托克斯光和泵浦光有可能达不到完全二阶相关。本文的计算结果可作为设计最优的拉曼组束和拉曼净化方案的参考, 尤其在采用多级拉

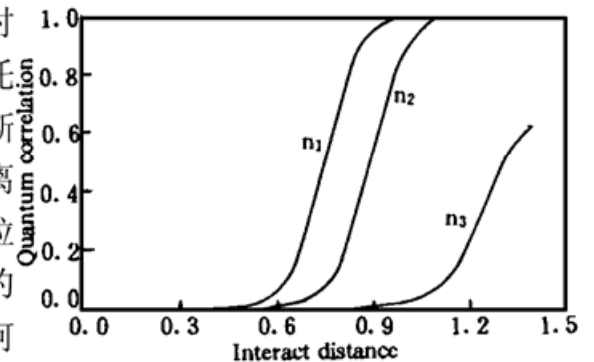


Fig. 1 The curve of second-order quantum correlation as the function of the interaction distance

曼放大的装置中, 如何保证输入斯托克斯光和泵浦光的二阶相关, 是获得高转换效率的重要条件。利用本文的计算结果, 可以有效地调节泵浦光和斯托克斯光的二阶相关系数, 设计出最优的方案。

参 考 文 献

- [1] B. Bobbs, J. A. Goldstone, M. M. Johnson, Phase-matched broad-band Raman amplifiers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(8) : 1896~ 1906
楼祺洪, 准分子激光束的拉曼组束. 光学学报, 1992, **12**(12) : 1057~ 1061
- [2] 向世清, 楼祺洪, 叶震寰等, 波导中宽带多束拉曼组束的理论分析研究. 光学学报, 1995, **22**(10) : 771~ 777
- [3] J. Eggleston, R. L. Byer, Steady-state stimulated Raman scattering by a multimode laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1980, **QE-16**(8) : 850~ 853
- [4] G. G. Lombaridi, H. Injeyen, Phase correlation in Raman amplifier. *J. Opt. Soc. Am (B)*, 1986, **3**(10) : 1461~ 1466
- [5] L. A. Westling, M. G. Raymer, Intensity correlation measurement in stimulated Raman generation with a multimode laser. *Phy. Rev. (A)*, 1987, **36**(10) : 4835~ 4844
- [6] M. G. Raymer, J. Mostowski, Stimulated Raman scattering unified treatment of spontaneous initiation and spatial propagation. *Phy. Rev. (A)*, 1981, **23**(10) : 1980~ 1994

Second-Order Quantum Correlation in Stimulated Raman Scattering

Xu Jianqiu Lou Qihong Ning Dong Xue Shaolin

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 8 November 1996; revised 28 February 1997)

Abstract Based on quantum theory and multimode model, concluding the pump depletion, the second-order quantum correlation as the function of interaction distance in stimulated Raman scattering (SRS) is calculated and analyzed. The analysis predicts that, in the absence of dispersion, the correlation between Stokes waves and the pump increases to unity when the increase rate depends on the ratio of the pump and input Stokes. In the limit, the results agree with the Raman generation theories and the semiclassical theories.

Key words second-order quantum correlation, stimulated Raman scattering, multimode model.