

聚焦束泵浦受激曼散射中的聚焦参数 及其对转换效率的影响

张梓华 张华安 仲志英

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

提 要

基于推导得的聚焦束泵浦的受激喇曼散射耦合方程组。从理论上讨论了聚焦对有吸收介质的SRS增长及转换效率的影响规律。建议采用 $B=L/Z_r$ 和 $K=l/L$ 作为泵浦束的聚焦参数。为使不同的实验结果可以比较、实验应给出该参数值。

关键词: 聚焦参数, 转换效率, 形状修正因子。

一、引 言

近来用受激喇曼散射法获得新波段的受激辐射已引起人们的兴趣^[1~3], 为提高效率常采用聚焦的泵浦方式。实验已观察到泵浦束的聚焦情况对各阶斯托克斯的发展影响颇大^[4], 故研究聚焦参数对喇曼光的生长及转换效率的影响规律是令人感兴趣的并已有文讨论过^[5,6]。但文献[5]在参数的选择上使问题复杂化, 因在池长 L 一定及泵浦束腰斑位于池中央的情况下, 入射光斑尺寸与腰斑尺寸之比 β 与束腰 W_0 中只能有一个量是独立的, 否则对应于不同波长的泵浦束, 讨论表明受激喇曼散射的阈值或转换效率与波长有关文献[6]的讨论未能给出聚焦参数影响的解析表达式、也未考虑吸收的影响。本文从聚焦束泵浦的受激喇曼散射的耦合方程出发、对聚焦参数的选取及其对转换效率的影响作较透彻的讨论。

二、聚焦束泵浦时的耦合方程组及解

受激喇曼散射是一个复杂的过程, 本文仅在于揭示聚焦对受激喇曼散射的影响、为简便, 只讨论一阶前向斯托克斯束, 高阶效应可由此类推。平面波泵浦时的受激喇曼散射过程中光子数密度 n 或强度 E^2 变化的耦合方程组已知道^[7,8]。对聚焦束泵浦时的耦合方程组应加入一个考虑聚焦效应的修正项^[9]。于是得到在考虑吸收损耗时的受激喇曼耦合方程组应为:

$$\begin{cases} \frac{dn_p}{dz} = -gn_p n_s - n_p \left[\frac{d}{dz} \ln(W_p^2) + \alpha \right], \\ \frac{dn_s}{dz} = gn_p n_s - n_s \left[\frac{d}{dz} \ln(W_s^2) + \alpha \right]. \end{cases} \quad (1)$$

对光强 $I(E^2)$ 有:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_p}{dz} &= -\frac{\nu_p}{\nu_s} g_0 I_p I_s - I_p \left[\frac{d}{dz} \ln(W_p^2) + \alpha \right], \\ \frac{dI_s}{dz} &= g_0 I_p I_s - I_s \left[\frac{d}{dz} \ln(W_s^2) + \alpha \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

此处 $g, g_0(=g/h\nu c)$ 分别为受激喇曼散射的光子和强度增益系数。 h 为普朗克常数, ν 为光频率, c 为光速。 W 为光斑尺寸, α 为吸收系数。脚标 p, s 分别表示泵浦光与斯托克斯光。一般说来 W_s 是未知的, 解方程组(1)很困难。考虑到受激喇曼散射是一个受迫过程, 喇曼光的成长受泵浦光控制, 虽然两者尺寸不一样, 但为便于计算可近似地认为两者变化趋势是一致的。即

$$\frac{dW_s}{dz} / W_s = \frac{dW_p}{dz} / W_p.$$

此时可解得方程组(1), 结果如下:

$$\left. \begin{aligned} n_p(z) &= \frac{\Phi(z)}{1 + \frac{n_s(0)}{n_p(0)} \exp\left\{g \int_0^z \Phi(z) dz\right\}}, \\ n_s(z) &= \frac{\Phi(z)}{1 + \frac{n_h(0)}{n_s(0)} \exp\left\{-g \int_0^z \Phi(z) dz\right\}}, \\ \Phi(z) &= n_p(z) + n_s(z) = [n_p(0) + n_s(0)] \left(\frac{W_p(0)}{W_s(0)}\right)^2 e^{-\alpha z}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $n_p(0), n_s(0)$ 为喇曼池入口处的光子数密度。一般说来, 泵浦束的焦点可位于池内或池外, 它对应于不同的泵浦束形状(图 1), 相应的增益效果亦不同。若设束腰距池入射端的距离为 l , 并规定腰斑位于激光器一侧时(图 1(a)) l 为正, 位于另一侧时 l 为负如图 1(b)、图 1(c)所示, 对于高斯型泵浦束, 考虑到光斑 W 与腰斑 W_0 的关系及 $n_p(0) \gg n_s(0)$, 此时(3)式中的积分可计算如下:

$$\left. \begin{aligned} \int_0^L \Phi(z) dz &= \int_0^L n_p(0) \left[\frac{W_p(0)}{W_p(z)} \right]^2 e^{-\alpha z} dz \\ &= n_p(0) \frac{W_p^2(0)}{W_0^2} Z_r \left[\tan^{-1} \frac{L/Z_r}{1+R} (1+\alpha l) - \frac{\alpha L}{2} \frac{Z_r}{L} \log \frac{1+(L+l)^2/Z_r^2}{1+(l^2/Z_r^2)} \right], \\ R &= \frac{(l+L)l}{Z_r^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

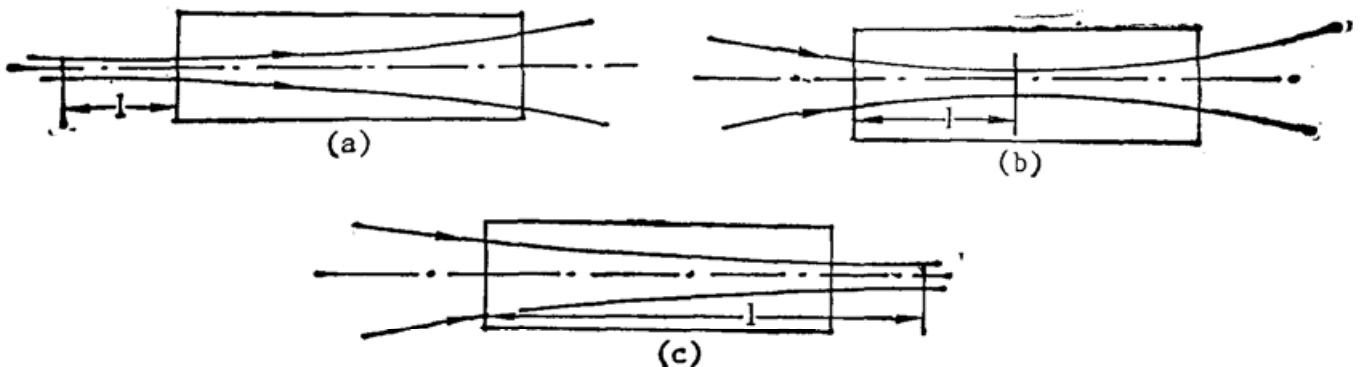


Fig. 1 The different focusing of pumping beam in the Raman Cell
 l — the distance between waist and inlet window of Raman Cell

定义 R 为泵浦束的形状因子。 \tan^{-1} 的定义域为 $[0, \pi]$ 。由此得到光子数密度随喇曼池长的变化规律为:

$$n_s(L) = \frac{n_p(0) \left[\frac{W_p(0)}{W_p(L)} \right]^2 e^{-\alpha L}}{\left\{ 1 + \frac{n_p(0)}{n_s(0)} \times \exp \left\{ -g \frac{n_p(0) W_p^2(0) Z_r}{W_0^2} \left[\left(\tan^{-1} \frac{L/Z_r}{1+R} \right) (1+\alpha l) - \frac{\alpha L}{2} \frac{Z_r}{L} \log \frac{1 + \left(\frac{L+l}{Z_r} \right)^2}{1 + \left(\frac{l}{Z_r} \right)^2} \right] \right\} \right\}}$$

$$n_p(L) = \frac{n_p(0) \left[\frac{W_p(0)}{W_p(L)} \right]^2 e^{-\alpha L}}{\left\{ 1 + \frac{n_s(0)}{n_p(0)} \times \exp \left\{ g \frac{n_p(0) W_p^2(0) Z_r}{W_0^2} \left[\left(\tan^{-1} \frac{L/Z_r}{1+R} \right) (1+\alpha l) - \frac{\alpha l}{2} \frac{Z_r}{L} \log \frac{1 + \left(\frac{L+l}{Z_r} \right)^2}{1 + \left(\frac{l}{Z_r} \right)^2} \right] \right\} \right\}}$$

(5)

考虑到光强 $I = nh\nu c$, 则可得到喇曼光强度增长的规律为:

$$I_s(L) = \frac{\nu_s}{\nu_p} \frac{P_p(0) e^{-\alpha L} / \pi W^2(L)}{\left\{ 1 + \frac{\nu_s}{\nu_p} \frac{I_p(0)}{I_s(0)} \times \exp \left\{ \frac{-g_0}{\lambda} P_p(0) \left[\left(\tan^{-1} \frac{L/Z_r}{1+R} \right) (1+\alpha l) - \frac{\alpha l}{2} \frac{Z_r}{L} \log \frac{1 + \left(\frac{L+l}{Z_r} \right)^2}{1 + \left(\frac{l}{Z_r} \right)^2} \right] \right\} \right\}}$$

(6)

式中 $P_p(0) = \pi W^2(0) I_p(0)$ 是泵浦光的功率, 由此可见增益与波长成反比, 泵浦光波长越短越有利于产生受激喇曼散射。在忽略吸收损耗的情况下有:

$$P_s(L) = \frac{\nu_s}{\nu_p} \frac{P_p(0)}{1 + \frac{\nu_s}{\nu_p} \frac{I_p(0)}{I_s(0)} \exp \left\{ \frac{-g_0 P_p(0)}{\lambda} \tan^{-1} \frac{L/Z_r}{1+R} \right\}}$$

(7)

这是介质无吸收损耗时斯托克斯光的的增长规律, 当泵浦光近似为平行光时, 即 $Z_r \gg L$, 有 $R \approx 0$ 及 $\tan^{-1} \frac{L/Z_r}{1+R} \approx L/Z_r$ 。在小信号增益的情况可推得

$$\left. \begin{aligned} P_s(L) &= P_s(0) \exp\{g I_0 L\}, \\ \text{及} \quad I_0 &= \frac{P_p(0)}{\pi W_0^2}. \end{aligned} \right\}$$

(8)

此时 I_0 表示束腰处的泵浦光强。(8)式与平面波小信号增益时的结果相同。

三、聚焦参数及其影响的讨论

以往的讨论中常有不同的聚焦参数的选取法, 作者认为选取泵浦束的特征参数 W_0 或

Z_r 以及束腰距池入射端的距离 l 较为合适。考虑到会聚或发散的程具有一定的相对性。为统一起见, 建议选取 $B=L/Z_r$ 和 $K=l/L$ 作为泵浦束的聚焦参数。 $K>0$ 为发散束泵浦, $K<0$ 为会聚束泵浦, $-1<K<0$ 则表示焦点位于池内。会聚或发散的程由参数 B 来决定。

从(6)式可看到聚焦参数的作用主要表现在对增益参数 F 的影响上。有

$$F = \tan^{-1} \frac{B}{1+R} + \alpha L \left(K \tan^{-1} \frac{B}{1+R} - \frac{1}{2B} \log \frac{1+B^2(1+k)^2}{1+K^2B^2} \right). \quad (9)$$

为得高的增长速率和转换效率, 则要求 F 值愈大愈好。为清晰起见可将 F 分为二项。一项为 $\theta = \tan^{-1} \frac{B}{1+R}$, 它与吸收无关; 另一项依赖于吸收 αL , 并记为 A 。

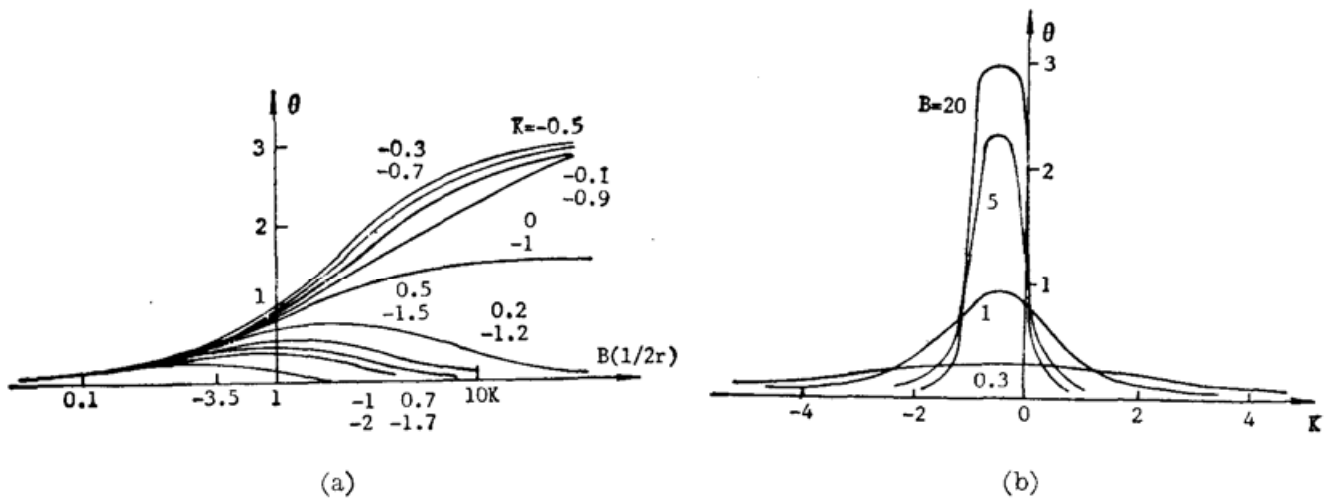


Fig. 2 The value of θ varies with the focusing parameters $K(l/L)$ and $B(L/Z_r)$.

(a) the relationship between θ and B at different K ;

(b) the relationship between θ and K at different B .

首先分析 $\theta(B, K)$, 当 $B \geq 1$ 时将泵浦束聚焦到池内与池端或池外有质的区别。聚焦于池内时, θ 的极限值是 π ; 而聚焦于池端时 θ 的极限是 $\pi/2$ 。聚焦于池外时, θ 的值永远小于 $\pi/2$ 。在图 2 中分别给出 θ 值随参数 B, K 变化的情况。图 2(a) 表明: 当 $-1 \leq K \leq 0$ 时 θ 随 B 单调上升, 而当 $K < -1$ 及 $K > 0$ 时, 即泵浦束聚焦于池外时, θ 不再是 B 的单调上升函数。而存在一个极值。将它所对应的 B 值记为 B_{\max} , 则有

$$B_{\max} = \frac{1}{\sqrt{K(K+1)}},$$

这意味着此时存在透镜焦距的选择问题。图 2(b) 表明泵浦束聚焦于在池内可获得大的增益。在 $K = -1/2$ 时 θ 值最大, 说明聚焦于池中央最佳泵浦方式。由于喇曼池有一长度与宽度。故外泵浦束聚焦愈强愈好, 过强的聚焦反而使焦点达不到池中部或损失相互作用体积, 增益反而下降。这表明即是聚焦于池内仍然存在最佳聚焦状态, 即最佳透镜焦距的选取问题。这一现象在实验上已观察到, 在此只是给它以理论解释。

再讨论增益参数中与吸收有关的部分。由(9)式知

$$A = \alpha L \left[K \theta - \frac{1}{2B} \log \frac{1+B^2(1+K)^2}{1+B^2K^2} \right] = \alpha L A'(K, B), \quad (10)$$

αL 表示吸收大小, $A'(K, B)$ 表示聚焦对吸收的增强作用。图 3 画出了 $A'(K, B)$ 随参数 B 、 K 的变化规律。 A' 值皆为负, 说明吸收使增益下降。当 B 值大(强聚焦)时, A' 在 $-1 < K < 0$ 区绝对值较大, 而在其他区域值较小, 且 A' 的极值位于出射窗($K = -1$)附近。而当 B 值小时, A' 的极值在池中央($K = -1/2$), 这说明当介质的吸收大时, 聚焦于池内, 特别是聚焦于池后半部会增加吸收引起的增益下降。计算表明。当 $\alpha L > 0.1$ 时最佳聚焦位置应稍向入射窗口一侧移动, 移动量与 αL 有关。 αL 愈大, 最佳聚焦位置愈接近入射窗口。

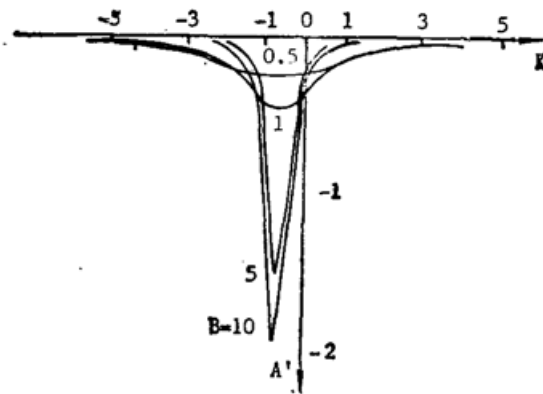


Fig. 3 The relationship between gain parameter $A'(K, B)$, characterizing the absorption Loss, and focusing parameter K or B .

$$A' = -K \cdot \theta - \log \left[\frac{1 + B^2(1 + K)^2}{1 + K^2 B^2} \right] / 2B.$$

一般情况, 由于吸收系数 α 值很小, 当池长 L 不大时可略忽略吸收的作用。如果计及泵浦束 r 沿方向有一分布, 此时喇曼光的的增长规律可表为:

$$I_s(r, L) = \frac{\nu_s}{\nu_p} \frac{P_p(0) e^{-\frac{r^2}{W^2(0)}} / \pi W^2(L)}{1 + \frac{\nu_s}{\nu_p} \frac{I_p(r, 0)}{I_s(r, 0)} \exp \left\{ -\frac{g_0}{\lambda} P_p(0) e^{-\frac{r^2}{W^2(0)}} \tan^{-1} \frac{B}{1 + R} \right\}} \quad (11)$$

考虑到 $I_s(r, L)$ 的分布情况, 则转换效率

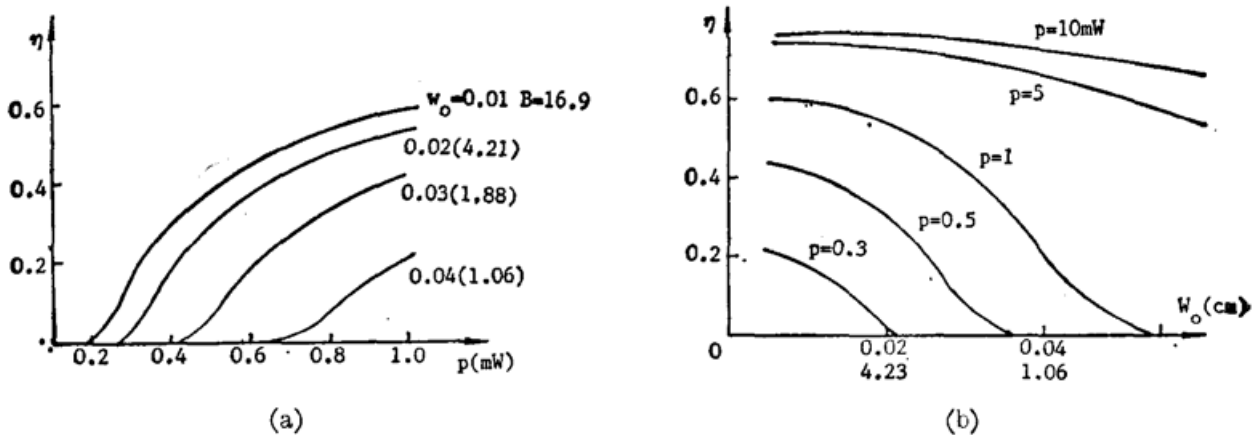


Fig. 4 The relationship between the conversion efficiency η and pumping power P or parameter B (or waist W_0)

- (a) the relationship between η and P at different B (or W_0);
- (b) the relationship between η and B (or W_0) at different P .

$$\eta = \frac{\int_0^s I_s(r, L) ds}{P_p(0)} = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\infty} \frac{\nu_s}{\nu_p} \frac{(e^{-\frac{r^2}{W^2(0)}} / \pi W^2(L)) r \cdot dr}{1 + \frac{\nu_s}{\nu_p} \frac{I_p(r, 0)}{I_s(r, 0)} \exp\left\{-\frac{g_0}{\lambda} P_p(0) e^{-\frac{r^2}{W^2(0)}} \theta\right\}} \quad (12)$$

图 4 给出了转换效率 η 与泵浦功率 P 及束腰 W_0 或参数 B 的关系。计算时取 $L=100\text{cm}$, $g_0=0.00223\text{ cm}(\text{MW}^{-1})$, $\lambda=0.532\text{ }\mu$, 并认定泵浦束处于最佳聚焦状态, 可看到曲线形状与文献[5]中的实验曲线是相似的。

四、小 结

本文从理论上讨论了泵浦束的聚焦对一阶斯托克斯前向散射光增长及转换效率的影响。结果表明受激喇曼散射增长与转换效率、聚焦程度及焦点位置有关, 这说明并非聚焦越强越好, 而是存在着最佳状态的选择。为使各种条件下的实验结果可以比较, 作者认为, 实验结果应同时给出聚焦参数值。并建议选用 $B=L/Z_r$ 和 $K=l/L$ 作为聚焦参数。在介质有吸收的情况下, 强聚焦于池中, 特别是聚焦于池后半部会增加吸收引起的增益下降。一般应使泵浦束的聚焦点稍向池入射端移动。在已知吸收系数的情况下, 可根据(10)式来选取最佳聚焦参数, B 、 K 以使 F 值最大, 从而获得高的转换效率。同时, 选取不同的聚焦参数可使我们达到控制一阶斯托克斯光的生长, 这对抑制高阶散射光的产生有利。

参 考 文 献

- [1] D. W. Trannor *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1982, **QE-18**, No. 11 (Nov), 1929.
- [2] R. Buruham *et al.*; *Opt. Lett.*, 1978, **3**, No. 7 (Jul), 215.
- [3] 金春植等;《中国激光》, 1988, **15**, No. 8 (Aug), 462.
- [4] 费浩生等;《激光杂志》, 1987, **8**, No. 1 (Jan), 14.
- [5] 袁一风等;《中国激光》, 1986, **13**, No. 7 (Jul), 428.
- [6] 张梓华等;《量子电子学》, 1988, **5**, No. 4 (Dec), 345.
- [7] N. Bloembergen; 《*Nonlinear Optics*》, (Benjamin, New York, 1965), 108.
- [8] A. Yariv; 《*Quantum Electronics, 2nd ed*》, (John Wiley & Sons Inc, New York 1975), 470.
- [9] Zhang Z. Hua, Zhang Huaan; *Proc. SPIE*, Vol. 1230, 265.

Focusing parameters in focused beam pumped SRS and their influence on conversion efficiency

ZHANG ZIHUA, ZHANG HUAAN AND ZHONG ZHIYING

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Hefei 230031)

(Received 30 March 1990; revised 3 October 1990)

Abstract

Based on the deduced coupled equations of SRS pumped by a focused beam, we discussed the influence of the beam focusing on the enhancement and conversion efficiency of SRS in an absorptive Raman medium. Two parameters: $B=L/Z_r$, $K=l/L$ are suggested as the focusing parameters. In order to compare the results obtained in different experiments, the values of B and K should be given in the papers.

Key words: focusing parameters, conversion efficiency, shape correction factor.