

CO₂激光在P-H₂中的受激喇曼转换

金春植 李殿军

摘要: 本文修正了 Byer 的分析结果, 推导出新的CO₂激光在程P-H₂腔池中受激喇曼散射激光输出功率的表达式, 并据此给出P-H₂池中泵浦激光最佳散射次数的公式, 为喇曼激光器设计及其性能分析提供了可靠的依据。

一、引 言

由于 UF₆、MoF₆、ZrF₄ 等重金属化合物分子的强吸收带位于 13~17μm 波段范围内, 因此获得该波段范围内输出的激光器就成为采用激光法分离重金属同位素的第一个关键性问题。1976年, Byer 根据受激喇曼散射原理, 首次提出用 P-H₂ 作散射介质, 用 CO₂ 激光作泵浦源, 能够输出 16μm 中红外激光的 P-H₂ 喇曼激光器的方案^[1], 并由 Byer 和 Rabinowitz 等人实施而获得成功^{[2][3]}。这种激光器对于分离吸收带位于 16μm 附近的 UF₆ 同位素来说, 是有相当发展前途的。与其它类型红外激光器相比, 它具有转换效率高、输出功率大、谱线连续可调等显著特点。因此, 该方案一开始就引起人们广泛的关注。目前, 它正朝着高重复频率和精密调谐技术等方向发展, 并取得了一些重大突破, 从而日趋成熟^[4]。

为提高喇曼增益和转换效率, 该方案采用两个相同的满足一定要求的凹面反射镜组成了一个稳定腔作为散射池, 使泵浦激光束在腔池中往返振荡若干次并且每次振荡都在腔池中心聚焦即实现所谓的腔模匹配。根据 Byer 的分析, 喇曼激光输出功率 P_s 可表示为:

$$P_s = R^{n-1} P_{s0} \exp\left(\frac{1-R^n}{1-R}\alpha\right) \quad (1)$$

式中 R 为反射镜反射率; P_{s0} 为自发喇曼噪声功率; n 为泵浦激光在腔池中的散射次数; α 为单程增益系数:

$$\alpha = \frac{4P_p G}{\lambda_p + \lambda_s} \tan^{-1}\left(\frac{L}{b}\right) \quad (2)$$

式中 P_p 为泵浦激光功率; G 为单位光强增益, 其值大小与泵浦激光的偏振状态及散射介质的温度、压力等参数有关; λ_p 和 λ_s 分别为泵浦激光和喇曼激光(指一级斯托克斯光)波长; L 为喇曼池腔镜的间距; b 为共焦参量并由下式给出:

$$b = 2\pi\omega_{p0}^2/\lambda_p \quad (3)$$

式中 ω_{p0} 为泵浦激光的光腰尺寸。

从上面式子及其推导过程可以看出, (1) 式只能适用于泵浦激光除反射损失之外没有其它损失的情况。其原因是在 Byer 的分析中假设了在整个散射过程中泵浦激光功率都保持不变——这显然是不符合实际情况的。因为在散射过程中泵浦激光功率不可能保持不变而是要

不断地转换为喇曼激光因而逐渐地衰减。与此同时，喇曼激光功率也将不断地因散射转换而逐渐地增强。所以在作理论处理时，必须把泵浦激光功率和喇曼激光功率均看作变量。尤其是在喇曼转换效率比较高的情况下，这考虑就显得更为重要。下面，我们来推导考虑了转换损失的新的功率计算公式。

二、输出功率公式的推导

推导之前先作如下简化：

1. 只考虑一级斯托克斯光，不考虑反斯托克斯光及后向散射；
2. 泵浦激光光束为TEM₀₀模和单纵模并且在空间上和时间上同样是高斯分布；
3. 泵浦激光光束与多程池腔模相匹配。

作如上简化后，当产生受激喇曼散射效应时我们有如下关系式^[5]：

$$\frac{\partial P_s}{\partial Z} = \frac{P_p G}{\pi} \frac{1}{\omega_s^2(z) + \omega_p^2(z)} P_s \quad (4)$$

式中 ω_s 和 ω_p 分别为喇曼激光和泵浦激光的光斑尺寸。

如前所述，上式中的泵浦激光功率 P_p 和喇曼激光功率 P_s 均为变量。如果我们设泵浦激光从 $Z = -L/2$ 处入射到多程 P-H₂ 腔池中并在 $Z = L/2$ 处被反射，那么在整个散射过程中 P_p 和 P_s 都应满足下面的关系式：

$$P_p = P_{p0} - \frac{\lambda_s}{\lambda_p} P_s \quad (5)$$

式中 P_{p0} 为 P_p 在 $Z = -L/2$ 处的入射功率值。据此，我们可以把(4)式改写为：

$$\frac{\partial P_s}{\left(P_{p0} - \frac{\lambda_s}{\lambda_p} P_s\right) P_s} = \frac{G}{\pi} \frac{\partial Z}{\omega_s^2(z) + \omega_p^2(z)} \quad (6)$$

于是，经过第一次散射（我们把光在腔池中两个反射镜之间传播一次称为散射一次，故散射次数与反射次数不同）之后，喇曼激光功率为：

$$\int_{P_s(-\frac{L}{2})}^{P_s(\frac{L}{2})} \frac{dP_s}{\left(P_{p0} - \frac{\lambda_s}{\lambda_p} P_s\right) P_s} = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{G}{\pi} \frac{dZ}{\omega_s^2(z) + \omega_p^2(z)} \quad (7)$$

积分上式：

$$\frac{\left(P_s - \frac{L}{2}\right) \left[P_{p0} - \frac{\lambda_s}{\lambda_p} P_s \left(-\frac{L}{2}\right) \right]}{P_s \left(-\frac{L}{2}\right) \left[P_{p0} - \frac{\lambda_s}{\lambda_p} P_s \left(\frac{L}{2}\right) \right]} = \exp \frac{4GP_{p0}}{\lambda_s + \lambda_p} \tan^{-1} \left(\frac{L}{b} \right) \quad (8)$$

根据上式积分物理意义可知: $P_s\left(\frac{L}{2}\right)$ 为经过第一次散射之后的喇曼激光功率, 现改写为 $P_{s,1}$; $P_s\left(-\frac{L}{2}\right)$ 为自发喇曼噪声功率, 现改写为 $P_{s,0}$ 。这样, (8)式即可改写为:

$$P_{s,1} = \frac{P_{s,0}e^\alpha}{1 + \frac{\lambda_s P_{s,0}}{\lambda_P P_{P0}}(e^\alpha - 1)} \quad (9)$$

上式即为经过第一次散射之后喇曼激光功率的表达式。下面推导经过 n 次散射之后喇曼激光功率的表达式。

对于第二次及以后各次散射, 与第一次散射所不同的是应考虑到反射镜的反射损失, 因此, 增益方程可一般地表示为:

$$\int_{RP_{s,i-1}}^{P_{s,i}} \frac{dP_s}{\left(R^{i-1}P_{P0} - \frac{\lambda_s}{\lambda_P}P_s\right)P_s} = \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{2G}{\pi} \frac{dZ}{\omega_s^2(z) + \omega_P^2(z)} \quad (10)$$

$i = 2, 3, \dots, n$

上式中符号 i 表示散射次数。积分上式并利用(9)式结果, 对于 $i = n$ 的情况有:

$$P_{s,n} = \frac{R^{n-1}P_{s,0}e^{\alpha\left(\frac{1-R^n}{1-R}\right)}}{1 + \frac{\lambda_s P_{s,0}}{\lambda_P P_{P0}} \left[e^{\alpha\left(\frac{1-R^n}{1-R}\right)} - 1 \right]} \quad (11)$$

上式即为在多程 P-H₂ 喇曼池中经过 n 次散射之后输出的喇曼激光功率的表达式。比较(1)式, 可以看出(1)式比(11)式少了在某些情况下不可忽略的分母项。当喇曼激光增益较小即满足条件

$$\exp \alpha \left(\frac{1-R^n}{1-R} \right) \ll P_{P0}/P_{s,0} \quad (12)$$

时, (11)式可以简化为(1)式:

$$P_{s,n} = R^{n-1}P_{s,0} \exp \alpha \left(\frac{1-R^n}{1-R} \right) \quad (13)$$

由此可知, 公式(1)仅仅能适用于喇曼激光功率增益较小的情况。

当喇曼激光增益较大即满足条件

$$\exp \alpha \left(\frac{1-R^n}{1-R} \right) \gg P_{P0}/P_{s,0} \quad (14)$$

时, (11)式可简化为:

$$P_{s,n} = R^{n-1} \cdot \frac{\lambda_P}{\lambda_s} P_{P0} \quad (15)$$

上式表明, 除反射损失外, 泵浦激光全部转换为喇曼激光, 这是量子效率达100%的情况。

当喇曼激光增益中等即满足条件

$$\exp \alpha \left(\frac{1-R^n}{1-R} \right) = P_{Po}/P_{s.o} \quad (16)$$

时, (11)式可简化为:

$$P_{s.n} = R^{n-1} \frac{\lambda_p}{\lambda_s + \lambda_p} P_{Po} \quad (17)$$

从(17)式我们可以看出,这时泵浦激光 P_{Po} 除反射损失外几乎全部都转换为喇曼激光。因此,有理由认为满足(16)式条件的散射次数 n ,就是最佳散射次数。这样,我们就可从(16)式求出最佳散射次数公式:

$$n = \ln \left[1 - \frac{(1-R) \ln P_{Po}/P_{s.o}}{\alpha} \right] / \ln R \quad (18)$$

三、结果与讨论

图1给出喇曼激光输出功率 $P_{s.n}$ 与散射次数 n 之间的关系曲线。图中曲线 a 为用(1)式计算的结果;曲线 b 为用(11)式计算的结果。

所取的具体参数值为:

$$P_{Po} = 15 \text{ MW}$$

$$P_{s.o} = 10^{-12} \text{ W}$$

$$G = 9.6 \times 10^{-6} \text{ cm/MW}$$

$$\lambda_p = 10.59 \mu\text{m}$$

$$\lambda_s = 16.95 \mu\text{m}$$

$$R = 98.5\%$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{L}{b} \right) \approx \frac{\pi}{2} \quad (\because L \gg b)$$

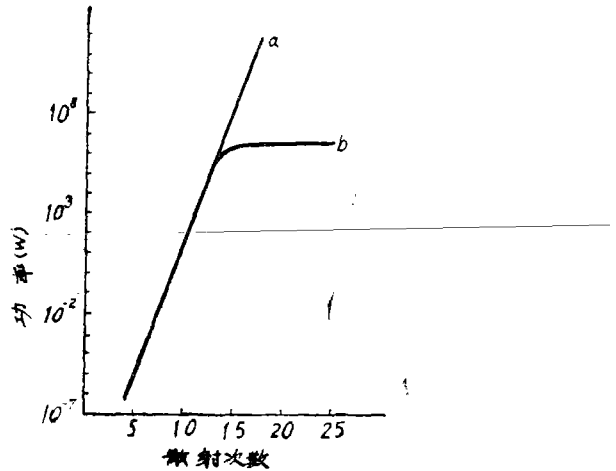


图1 喇曼输出功率与散射次数的关系曲线。

从图1中可以看出,当喇曼激光功率较小时,曲线 a 与曲线 b 重合得很好,但当喇曼激光功率较大时,两曲线就有了明显的差别。根据曲线 a ,我们可以推出喇曼激光功率超过泵浦源 CO_2 激光功率的结果。这显然是荒谬的。而曲线 b 就不会导致这样的结果。根据曲线 b ,在开始阶段喇曼激光功率随着散射次数的增加而增加,随后达到饱和,此时泵浦激光功率基本耗尽,喇曼激光功率达到最大值,此后,喇曼激光功率将因反射镜的反射损失而逐渐衰减下去。所以,为使喇曼激光功率输出最大,这里存在着一个最佳散射次数的问题。

图2表示的是按照(18)式计算的泵浦激光功率 P_{Po} 和最佳散射次数 n 之间的关系曲线。计算所取的参数值与图1所取的参数值相同。我们可以看出,最佳散射次数随着泵浦激光功率的增加而减少。因此,为减少反射损失,在考

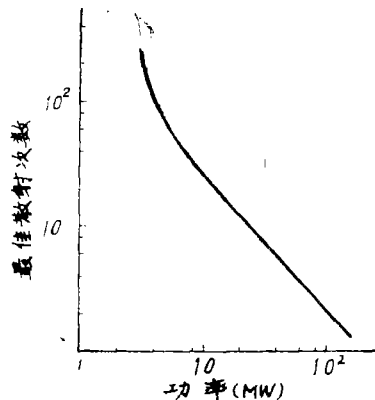


图2 泵浦功率与最佳反射次数的关系曲线。

虑到窗口和腔镜破坏阈值及散射介质 P-H₂ 气体电离击穿的前提下, 应该尽量提高泵浦激光的功率水平。例如对于 R = 98.5% 反射镜, 如果通过提高泵浦激光率把最佳散射次数由 25 次减少到 13 次, 那么根据 (17) 式我们就可算出这时激光输出功率提高了大约 20% 左右。这些表明, 提高泵浦功率, 则可以提高转换效率。

图 3 表示的是按 (11) 式计算得到的能量转换效率 η 与泵浦激光功率 P_{r0} 之间的关系曲线。图中四条曲线的参数除 G 值之外全部相同; 其中散射次数取值为 $n = 21$ 次, 其余参数值与图 1 所取的参数相同。因 G 值与散射介质的温度、压力以及泵浦激光的偏振状态有关, 所以图 3 实际上表示的是不同温度、不同压力及不同偏振状态情况下能量转换效率与泵浦激光功率之间的关系。G 所取的具体值为:

曲线 1:

$$G = 9.6 \times 10^{-6} \text{cm/MW} \quad (\text{圆偏振, } 1 \text{ atm, } 77^\circ\text{K})$$

曲线 2:

$$G = 6.4 \times 10^{-6} \text{cm/MW} \quad (\text{线偏振, } 1 \text{ atm, } 77^\circ\text{K})$$

曲线 3:

$$G = 2.0 \times 10^{-6} \text{cm/MW} \quad (\text{圆偏振, } 1 \text{ atm, } 300^\circ\text{K})$$

曲线 4:

$$G = 1.3 \times 10^{-6} \text{cm/MW} \quad (\text{线偏振, } 1 \text{ atm, } 300^\circ\text{K})$$

图中四条曲线虽然各自单位光强增益不同, 但当泵浦激光达到一定功率时, 它们的能量转换效率都会到达最大值:

$$\eta = R^{20} \frac{\lambda_p}{\lambda_s} = 46\%$$

林太基同志对本文提出了宝贵的意见, 在此表示衷心感谢。

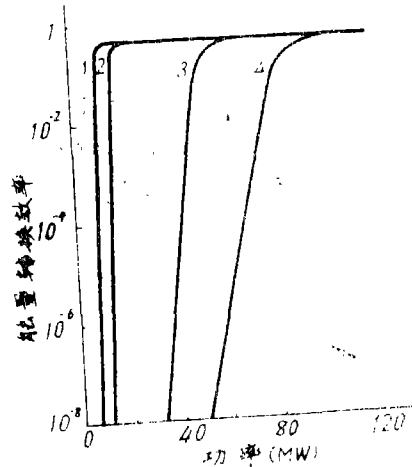


图 3 能量转换效率与泵浦功率的关系曲线。

参 考 文 献

- [1] R.L.Byer; IEEE.J.Quantum Electron, 1976, 12, 732-733.
- [2] R.L.Byer and W.R.Trutna; Opt.Lett., 1978, 3,144.
- [3] P.Rabinowitz et al.; Appl.Phys.Lett., 1979, 35, 739.
- [4] 難波 進 ほか; レーザー-科学研究, 1982, No4, 111-116.
- [5] W.R.Trutna and R.L.Byer; Appli.Opt., 1980, 19, No2, 301.

Stimulated Raman Conversion in CO₂-pumped P-H₂

Jin Chunzhi Li Dianjun

Abstract

In this paper we devised a simple expression for the output power of stimulated Raman scattering in a multipass cell. It is convenient and usefull in the design of P-H₂ Raman laser.