

# 大气中 $N_2$ 的受激转动拉曼散射

宋如华

(电子科技大学物理系, 成都 610054)

乐时晓

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

本文概述了大气中  $N_2$  的受激转动拉曼散射 (SRRS), 总结了近年来该领域的理论和实验研究工作, 并对一些迄今尚未解决的问题进行了讨论。

1962年, E. L. Woodbury 等<sup>[1]</sup>首先在液体中观察到受激拉曼散射 (SRS), 此后有关的理论和实验工作有了很大的进展<sup>[2,3]</sup>, 但一直限于对固体、液体和高压气体进行研究, 而对于常压及低压气体 (如大气), 则由于 SRS 增益很小而没有予以考虑。近年来, 由于作为激光武器的强激光技术的发展, 人们开始注意激光在常压气体中的 SRS。特别是由于  $N_2$  的 SRRS 是大气中已知阈值功率最低的非线性效应之一, 因而深入研究它具有重要意义。

1978年, V. S. Averbakh 等<sup>[4]</sup>分析了  $N_2$  的受激转动拉曼散射和受激振动拉曼散射 (SVRS)。他们的理论分析和实验结果表明, 在气压  $P > 10\text{atm}$  区域, SVRS 占优势, 相应地抑制了 SRRS; 但当气压  $P < 10\text{atm}$  时, SRRS 明显增强, SVRS 相对减弱; 特别当  $P < 2\text{atm}$  时, 则 SRRS 的阈值明显低于 SVRS, 而在  $P \sim 1\text{atm}$  附近, SVRS 明显被抑制, 这时主要是 SRRS 起主导作用。相应的气压与 SRS 增益系数关系见图 1 所示。由图可知, 在大气中 (特别是高层大气中), 对强激光束大气传播产生实质性影响的是  $N_2$  的 SRRS, 而拉曼光的出现将对原光束的强度分布及发散角产生很大影响, 从而降低激光武器的攻击能力。Averbakh 等还发现,  $N_2$  的转动跃迁中  $S(8)$  首先达到阈值光强, 其次是  $S(10)$  和  $S(6)$  等。

M. Rokni 等<sup>[5]</sup>分析了大气中两种主要成  
物理

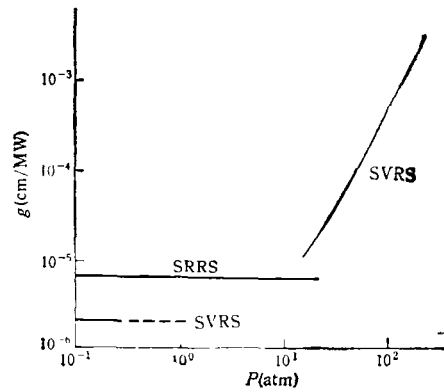


图 1 气压  $P$  与增益系数  $g$  的关系曲线 (SRRS, SVRS 同时存在)

分  $N_2$  和  $O_2$  的 SRRS, 理论结果表明, 在常温常压 (或低压) 下,  $N_2$  的稳态 SRRS 阈值比  $O_2$  的稳态阈值低。因而在通常大气条件下,  $N_2$  的  $S(8)$  转动跃迁具有最低阈值, 是影响强激光大气传输性能的首要因素。进一步, Rokni 等分析了  $N_2 S(8)$  跃迁在不同的菲涅耳数和泵浦波长情况下的增益和阈值强度 (见表 1 和图 2), 结果显示出阈值强度  $P_c$  随  $F$  的增大 (或  $\lambda_p$  的减少) 而减小, 由此可以视实际需要作为选择有关参数的依据。

由于作为激光武器的强激光需要在垂直于地面的上行和下行方向传输, 因而必须考虑随高度 (海平面为零点) 变化的大气密度对  $N_2 S(8)$  SRRS 有关参数的影响。G. C. Herring 等<sup>[6]</sup>利用标准大气模型, 讨论了  $N_2 S(8)$  SRRS

表 1  $S(8)$  增益及阈值与非程耳数的关系

非程耳数 $F$	2	5	10	20
增益距离积 $G_{90}(\text{cm}/\text{MW})$	42.1	41.1	40.4	39.7
阈值 $P_c(\text{MW}/\text{cm}^2)$	1.27	1.24	1.22	1.20

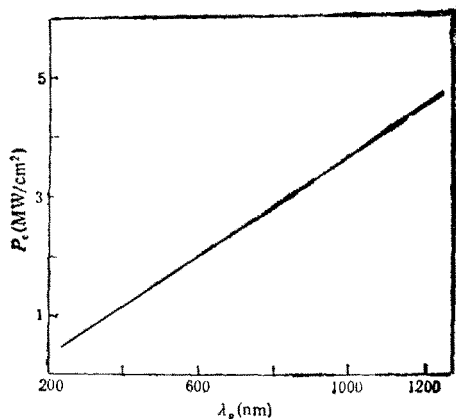


图 2  $N_2 S(8)$  SRRS 阈值强度  $P_c$  与入射泵浦波长  $\lambda_p$  之间的关系

增益随高度的变化关系。如图 3, 从海平面开始到竖直高度约 20km 处, 增益逐渐增大, 然后随高度的继续增大, 增益开始下降, 当到达 80 km 处, 增益几乎降为零。因而, 强激光在高空传输对保证光束质量十分有利。当然, 这里没有考虑高层大气空间的其他光学效应(如湍流等), 实际的情况还要复杂得多。

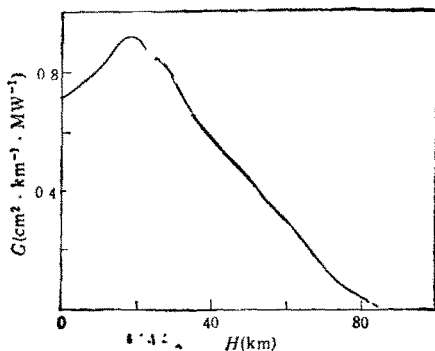


图 3  $S(8)$  增益  $G$  随高度  $H$  的变化关系

此外,  $N_2$  的转动拉曼谱线自加宽系数以及与集居数反转有关的玻耳兹曼分布都与绝对温标有关, 而它们又将影响增益系数, 因而拉曼增益系数将随  $T$  的变化而变化<sup>[7]</sup>, 其结果见图 4

所示。

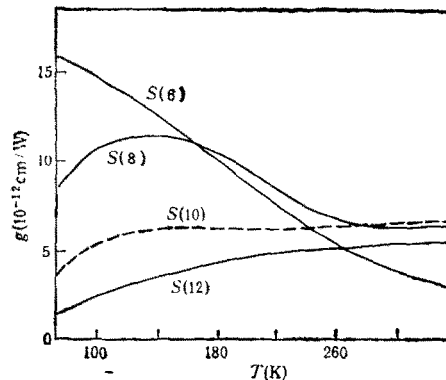


图 4 SRS 增益系数  $g$  与温度  $T$  的关系

以上讨论的结果都是在稳态条件下得到的, 即适用于泵浦光为连续激光, 或脉冲激光脉宽  $t_p \gg \tau_R$  ( $\tau_R$  为拉曼介质的弛豫时间常数) 的情形。但当  $t_p \sim \tau_R$  时, 则应该考虑瞬态效应<sup>[8]</sup>, 详细的分析表明, 阈值功率随  $t_p$  的减小(脉宽变窄)而增大(见图 5 所示), 而这正是我们所希望的。此外, 当激光上行时, 对于一定的脉宽  $t_p$ ,  $t_p/\tau_R$  随海拔高度增加呈减小趋势(见图 6 所示)。由此可知, 在高层大气中, 瞬态效应更为明显, 因而对阈值的影响亦更显著。通常认为,  $t_p/\tau_R \leq 10$  时, 则必须考虑瞬态效应, 而当  $t_p/\tau_R \geq 20$  时, 则可作为稳态的情形来处理。这与 Averbakh 早期的实验结果是一致的。他们利用脉宽为 2.5 ns 的激光 ( $t_p/\tau_R \approx 20$ ), 得到的阈值与稳态理论给出的一致, 但当用 1 ns 脉宽的脉冲激光 ( $t_p/\tau_R \approx 8$ ), 发现阈值明显高于稳态计算值, 说明此时应计入瞬态

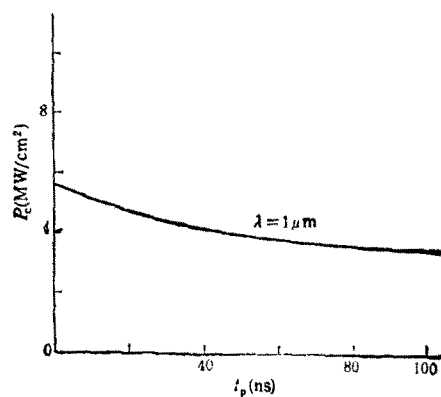


图 5 阈值强度  $P_c$  随脉宽  $t_p$  的变化关系

效应。而 M. A. Henesian 等<sup>[9]</sup>利用 Nova 激光器所做的实验结果表明,  $\tau_p = 1\text{ns}$  时的阈值比  $\tau_p = 2.5\text{ns}$  的阈值高约 30—40%。

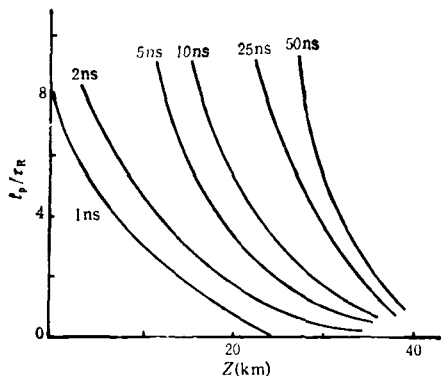


图 6  $\tau_p/\tau_R$  随海拔高度  $Z$  的变化关系

迄今为止,对大气中  $N_2$  的 SRRS 研究有了一些进展,某些问题(如稳态 SRRS 问题)已基本清楚,但与实际条件相比,有关理论是在作了多次近似下获得的,相应的实验数据也不多,因而还有许多疑难尚未解决。例如,在  $\tau_p \ll \tau_R$  时的 SRRS 机制尚不清楚,当光束质量较差(强度的空间调制度大于 50%,甚至更高)时, SRRS 的行为有何变化? 国内 LF-11 激光器所做的 SRRS 实验首先观察到  $S(6)$  跃迁谱线,这是否意味着此时  $S(6)$  的阈值最低? 由于 LF-11 激光的光束质量很差(空间调制度 70%),因而一种可能的解释是光束质量对大气

中  $N_2$  的 SRRS 影响很大。但目前尚无定量的关系,有待进一步的理论分析和实验研究。

综上所述,要保证强激光在大气中传输的质量,除了采取一些补偿措施外,提高非线性光学效应(如 SRRS)的阈值是一种行之有效的方法。对于 SRRS, (1)选择较长的波长, (2)选择较短的脉冲宽度, (3)将激光武器部署在高层空间, (4)改善光束质量以及加大发射光学部件尺寸, (5)使用具有合适间隔的系列脉冲串等可保证强激光在传输中的质量。

作者衷心感谢胡志平同志给予的帮助及许多有启发性的讨论。

- [1] E. L. Woodbury et al., *Proc. IRE*, **50** (1962), 2347.
- [2] Y. R. Shen et al., *Phys. Rev. A*, **137** (1965), 1787.
- [3] N. Bloembergen, *Am. J. Phys.*, **35** (1967), 989.
- [4] V. S. Averbakh et al., *Sov. J. Quant. Electron.*, **8**(1978), 472.
- [5] M. Rokni et al., *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-22** (1986), 7, 1102.
- [6] G. C. Herring et al., *Appl. Opt.*, **26**(1987), 15, 2988.
- [7] G. C. Herring et al., *Opt. Lett.*, **11** (1986), 6, 348.
- [8] 胡志平等, *电子科技大学学报*, **18**(1989), 3, 267.
- [9] M. A. Henesian et al., *Opt. Lett.*, **10**(1985), 11, 565.

(上接第 696 页)

## 2. 生长的物理、化学条件

对溶剂的选择要注意氧化与还原的稳定性。它直接影响到杂质价态的变化和晶体的颜色,如  $Co^{3+}$  为茶色,  $Co^{2+}$  为蓝色,  $Fe^{2+}$  为绿色,  $Fe^{3+}$  为黄色。生长溶液中过饱和度的提高有助于杂质的介入,加大温差对生长彩色水晶有利,但压力过高则伴有排杂作用。彩色水晶的生长为进一步生长高纯度、高  $Q$  值的抗辐射水晶提供了借鉴。

## 3 要注意 $Al^{3+}$ 的作用

$Al^{3+}$  色心在水晶中极易形成,生长彩色水

晶应注意  $Al^{3+}$  的作用,对色心型水晶尤为重要。

- [1] K. Nassau and B. E. Prescott, *Smoky, Blue, Greenish, Yellow and other Irradiation-Related Color in Quartz*, *Mineralogical Magazine*, **41** (1977), 319.
- [2] 经和贞、胡秀云、李义忱, *人工晶体*, **15-4**(1986), 240.
- [3] 仲维卓、冯锡琪、华素坤, *人工晶体*, **15-3**(1986), 172.
- [4] 仲维卓、华素坤、施尔畏, *人工晶体学报*, **19-4**(1990), 312.
- [5] 施尔畏、仲维卓、华素坤, *无机材料学报*, **5-4**(1990), 290.
- [6] 仲维卓等著, *人工水晶*, 科学出版社, (1983), 103.
- [7] 施尔畏、路治平、仲维卓, *无机材料学报*, **4-4**(1989), 305.