

文章编号: 1672-8785(2009)07-0022-05

喇曼频移中甲烷气压对 $1.54\mu\text{m}$ 喇曼散射 红外激光输出功率下降的影响分析

张琳琳 汪岳峰 黄 峰 殷智勇

(军械工程学院光学与电子工程系, 河北石家庄 050003)

摘 要: 在实际使用中, 喇曼激光器工作 4 年至 5 年, 其红外激光输出功率会明显下降(下降幅度可达到 50%~70%)。本文在理论上阐述了工作气体甲烷的漏气现象以及气体光分解反应是激光输出功率下降的主要原因。实验表明, 随着甲烷气压的增高, 喇曼频移中高阶斯托克斯光将会增强, 从而抑制一阶斯托克斯光, 同时甲烷气体在实验中产生光分解反应并在喇曼窗口产生沉淀污染, 这些均极大地降低了输出激光的效率。针对以上问题, 考虑提高喇曼盒的制作工艺以提高其密封性能, 减少漏气现象, 同时加入缓冲气体(如 $\text{H}_2, \text{He}, \text{Ar}$) 以在一定程度上抑制甲烷的光分解反应。

关键词: 喇曼频移; 甲烷; 激光器; 人眼安全

中图分类号: TN244 **文献标识码:** A

Effect of Methane Gas Pressure on Decreasing of $1.5\mu\text{m}$ Raman Scattering Infrared Laser Output Power in Raman Shift

ZHANG Lin-lin, WANG Yue-feng, HUANG Feng, YIN Zhi-yong

(Optical and Electronic Engineering Department, Ordnance Engineering College,
Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In the practical use, the output power of an infrared Raman laser will be decreased obviously (up to 50%~70%) after it is used for four or five years. In this paper, it is declared theoretically that the leakage and photolysis reaction of the methane gas used are the the main reasons why the laser output power is decreased. The experiment shows that with the increase of the pressure of the methane gas, the high order Stokes light will be enhanced and the first order Stokes light will be inhibited in the Raman shift. At the same time, the photolysis reaction of the methane gas can result in the precipitation at the Raman window. To solve these problems, it is necessary to improve the sealing performance of the Raman laser and add buffer gas (e.g. $\text{H}_2, \text{He}, \text{Ar}$) in the laser so as to inhibit the photolysis reaction of the methane gas to a certain extent.

Key words: Raman shift; methane; laser; eye-safe

1 引言

喇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, 早已引起人们的广泛注意。受激喇曼散射是强激光与物质相互作用所产生的受激声子(光学支声子)对入射光的散射

收稿日期: 2009-02-27

作者简介: 张琳琳(1985-), 女, 山东泰安人, 硕士研究生, 2007年毕业于军械工程学院军用光电工程专业, 现主要从事人眼安全激光器以及人眼安全激光测距机的研究。linlinbaobei19850602@yahoo.cn

[1], 喇曼激光器是利用介质的受激喇曼效应, 从泵浦激光光束中产生它的斯托克斯和反斯托克斯线激光输出的激光器。甲烷气体是目前产生近红外 (1.54 μm) 喇曼散射激光输出最好的一种介质。而喇曼激光器因其技术成熟、结构简单、价格低廉, 在国内一直被作为主要人眼安全激光器。

2 喇曼频移激光技术的发展与应用

1986年, 美国休斯飞机公司利用高压甲烷气体研制成基于喇曼频移技术的 1.54 μm 人眼安全激光测距机 [2]; 1991年, 该公司进一步发展喇曼频移技术, 研制成重复频率达 15Hz 的喇曼频移激光测距机并将其用于光电传感器跟踪系统 [3]。国内研制的人眼安全激光测距机主要也是运用甲烷喇曼频移 Nd:YAG 产生 1.54 μm 人眼安全激光的, 并且于 1990 年完成了喇曼频移原理样机的研制 [4]。西南技术物理研究所已成功开发出实用化的手持式喇曼激光测距机, 其重复频率可达 15Hz [5]; 目前, 人眼安全喇曼激光测距机已大量装备部队。

虽然甲烷喇曼频移技术已经在国内外得到了较为充分的应用, 但是采用高压甲烷气体喇曼频移 Nd:YAG 输出 1.54 μm 激光的激光器体积大, 高压密封技术要求高, 具有可靠性差、保障难、安全性差等问题 [6], 而且往往存在激光功率下降的现象, 因而影响了人眼安全激光测距机的应用。我们对实际使用中的五台喇曼频移激光器进行了测试。结果表明, 五台激光器在使用五年之后, 其激光功率均明显下降了 (下降幅度为 50% ~ 70%)。本文对甲烷气压对激光器输出能量的影响进行了系统的研究与分析。

3 理论分析

气体介质喇曼激光器的最佳化主要取决于气体压力和泵浦激光强度的最佳化。甲烷气体受激喇曼效应的研究表明, 明显的介质反射镜的损伤、受激布里渊散射、反斯托克斯线和二级斯托克斯线的产生都对能量转换效率有影响。从理论上来说, 把 1.06 μm 波长的泵浦激光转换为 1.54 μm 波长的喇曼散射光的最大能量转换效率仅为 65%, 其余的能量均作为热散失在介质中了。文献 [7] 报道, 利用重复频率为 60Hz 的 Nd:YAG 激光器泵浦甲烷气体得到 1.54 μm 受激喇曼散射光的能量转换效率为 30%, 该喇曼激光器的工作参数如表 1 所示。

上述实验说明, 在其他条件不变的情况下, 甲烷气体对喇曼频移的影响是导致激光器输出能量下降的主要因素。甲烷喇曼频移之所以不稳定, 很重要的一个因素是因为甲烷需要在高压条件下工作, 因此气压对于甲烷喇曼频移具有重要影响。

3.1 气压对于激发态分子数的影响

当气压降低时, 激发态分子的寿命变长, 等效于激发态分子数增加; 但同时分子密度也会随气压的下降而减小, 引起激发态分子数的减少, 因此气压不能过低。当气压增加时, 分子密度增加, 激发态分子数也增加, 但激发态分子的寿命会随气压的增加而大幅减小, 等效于激发态分子数便急剧减少, 因此气压也不能过高 [8]。

在实际使用过程中, 当喇曼盒工作时, 甲烷气体应工作在高气压环境下, 但由于受国内现有工艺的限制, 喇曼激光测距机中的喇曼盒密封性能不佳, 甲烷气体的气压随着使用时间的延长均存在不同程度的漏气现象。因此, 使用四到五年之后, 甲烷气体气压逐渐降低, 喇曼盒内

表 1 用 60Hz、1.06 μm 波长 Nd:YAG 激光器泵浦的喇曼激光器的工作参数

	波长 (μm)	能量转换 效率 (%)	输出能量 (mJ)	脉冲宽度 (ns)	脉冲与脉冲的均 方根偏差 (%)	光束发散角与 孔径的乘积
Nd:YAG 泵浦激光器	1.064	1.4	86	22	1 ~ 1.5	14.3
甲烷喇曼激光器	1.544	30	15	17	6	14.0

的激发态分子迅速减少,极大地降低了输出激光的功率。

3.2 气压对于泵浦阈值的影响

阈值取决于工作物质、气压、光和物质相互作用的作用区长度以及光学系统等多方面的因素。实际上,阈值与增益成反比,即阈值能量 $E_{th} \propto \frac{1}{g_{s_1}}$, 其中 g_{s_1} 为一阶斯托克斯散射增益系数。

对于气体,单位体积分子数 $N = p/KT$, 其中 p 为气压,则

$$g_{s_1} = \frac{c^2[1 - e^{-h(v_i - v_{s_1})/KT}]}{hv_{s_1}^3 n^2 KT} \frac{d\sigma}{d\Omega} \frac{p}{\Delta v} I_i \quad (1)$$

因此 $g_{s_1} \propto \frac{p}{\Delta v}$, 故有

$$E_{th} \propto \frac{\Delta v}{g_{s_1}} \quad (2)$$

式中, p 为甲烷气压。

自发喇曼散射线宽

$$\Delta v = \Delta v_D + \Delta v_C \quad (3)$$

式中, Δv_D 为多普勒展宽线宽, Δv_C 为碰撞展宽线宽。

由于

$$\Delta v_C = \rho V \sigma_C, \quad \Delta v_D = \frac{D_0 V \sigma_H}{\rho} \quad (4)$$

式中, D_0 为常量, σ_C 和 σ_H 分别为分子碰撞和多普勒展宽有效截面,均方根速率 $V = \sqrt{3KT/m}$, 分子密度 $\rho = \frac{p}{KT}$ 。

故可以得到

$$E_{th} \propto A + \frac{B}{p^2} \quad (5)$$

式中, A 、 B 为常数。可以看出,阈值与气压的平方成反比^[8]。

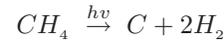
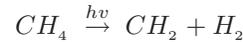
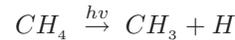
因此,在实际使用中,当甲烷气体泄露或者分解之后,随着甲烷气体气压的下降,激光器泵浦阈值会迅速升高,会极大地增加激光输出的难度。

3.3 气压对喇曼位移的影响

甲烷的激光诱导离解(LID)过程和激光诱导击穿(LIB)过程都可以使甲烷分子分解,从而产

生碳自由基和碳离子,它们与窗口材料反应后会产生碳斑,从而沾污窗口。

甲烷的LID光解初级过程有:



LIB是介质吸引多光子电离后引起介质击穿的一种复杂行为。一般杂质分子的离解能和电离能都较低,当甲烷气体含有杂质成分时,它们总是首先被解离或电离,然后诱发甲烷气体击穿。喇曼频移(SRS)是一个三阶非线性过程,一旦LIB过程产生,产生的等离子体将强烈吸收气体中的激光,从而导致输出光强的急剧下降。即LID过程和LIB过程严重干扰喇曼频移过程^[9]。

4 实验分析

在所有的参数中,最重要的是工作气体的喇曼频移以及喇曼增益。氢气(H₂)、氘气(D₂)和甲烷气体(CH₄)是最常见的喇曼工作气体。图1所示为各种气体的稳态增益系数与气体压力的关系曲线。表2列出了各种气体的喇曼频移以及计算喇曼增益系数所需的相关参数,并给出了在2MPa气压和25℃温度下的稳态增益系数^[10]。由此可以看出,氢气具有增益系数大、干净、价廉的特点,但其频移较大。氘气具有较小的喇曼频移,但增益系数较小且价格较昂贵。而甲烷气体则具有较理想的增益系数、频移以及廉价的特点,因此成为目前喇曼频移人眼安全近红外激光器的最佳工作气体。

上海光学精密机械研究所进行了355nm波长的光在纯甲烷下的受激喇曼散射的实验。图2和图3分别为剩余抽运光和各阶斯托克斯光以及一阶反斯托克斯光与气体压力的关系实验曲线^[10]。甲烷的斯托克斯光与压力的关系曲线比较简单,在现有的压力范围内呈单调上升的趋

表 2 各种气体的喇曼频移及在 295K 温度下计算喇曼增益系数的相关参数, 增益系数是气压为 2MPa 时的数据

气体	喇曼频移 (cm ⁻¹)	ΔN (cm ⁻³)	$\Delta v(10^{-3}\text{cm}^{-1}), p/\text{atm}$	$d\sigma/d\Omega / (10^{-30}\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1})$	$gR/(\text{cm}\cdot\text{GW}^{-1})$
H ₂ Q(1)	4155	0.66N _{tot}	11.2/p+1.58p	0.79	2.72
D ₂ Q(2)	2987	0.38N _{tot}	3.67/p+3.58p	0.80	0.56
CH ₄ Q	2917	N _{tot}	320+12p	2.7	0.63

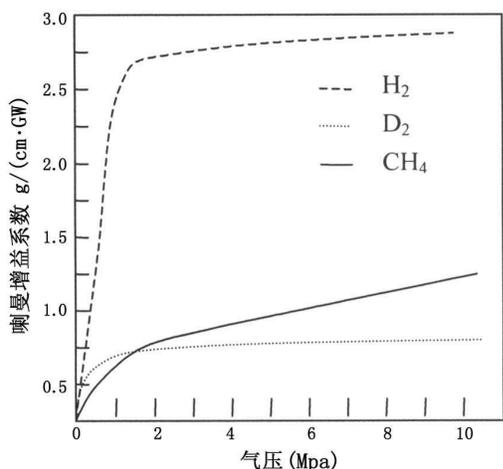


图 1 稳态增益系数与气体压力的理论关系曲线

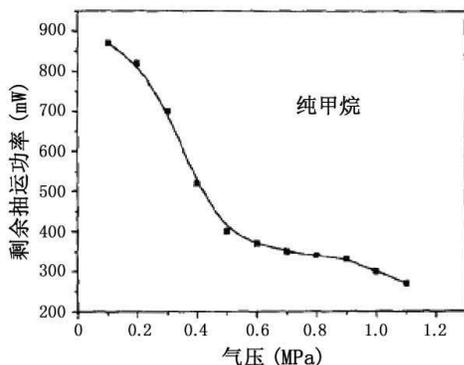


图 2 剩余抽运光与气体压力的关系 (纯甲烷)

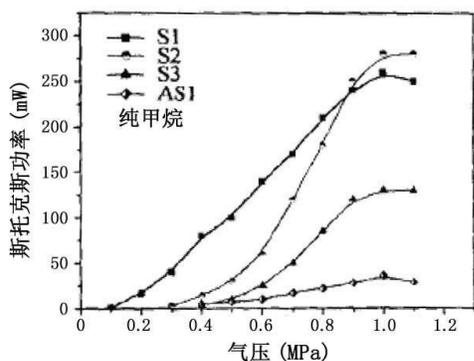


图 3 斯托克斯光与气体压力的关系 (纯甲烷)

势。在压力达到并超过 10 atm 以后, 二阶斯托克斯光超过了一阶斯托克斯光。此外, 在实验中, 入射窗口上有明显的黑色沉淀, 这是由于在高功率紫外激光的作用下甲烷被分解反应并在喇曼窗口产生沉淀污染所致。因此, 实验证明, 随着甲烷气压的增高, 喇曼频移中高阶斯托克斯光会增强, 从而抑制一阶斯托克斯光。同时, 甲烷气体的光分解反应也会降低输出激光的效率。

5 结束语

以上论述到的甲烷喇曼频移中气压的变化, 无论是喇曼盒漏气还是甲烷气体的光分解, 其引起的各方面性能指标的变化, 在激光测距机实际工作中均会带来严重的后果。

在使用当中, 可以考虑提高制作工艺, 增强喇曼盒的密封性能, 同时采取一些改进的办法以增强一阶斯托克斯光或抑制高阶斯托克斯光的输出特性。比如用加缓冲气体 (H₂, He, Ar 等) 的办法就可以有效地抑制高阶斯托克斯光, 从而增强一阶斯托克斯光^[10]。

目前, 对于人眼安全激光器的研究, 最为热门的是 OPO 激光器。相比于喇曼激光器而言, OPO 具有重复频率高、容易获得较大的输出能量、可全天候工作、对烟雾和海雾的穿透能力较强等优点。因此可以预言, 输出 1.57 μm 激光的 OPO 激光器是替代目前普遍使用的喇曼频移激光器, 从而成为远程沿海光电武器系统中人眼安全激光器的重要解决方案之一。

本论文的实验由上海光学精密机械研究所完成, 谨致谢意。

参考文献

[1] 谭勇, 张喜和, 孙秀平. 光纤喇曼放大器中的后向自发喇曼散射噪声 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36: 440-442.

[2] Nickkols R W, Ng W K. Raman shifted Nd : YAG class I eye-safe laser development [C]. *Proc. SPIE*, 1986, **610**: 92-98.

[3] Strultz R D, Gregor D E M. Eyesafe high pulse rate laser progress at Hughes [C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1419**: 64-74.

[4] Zhong Minget al. The comparison of 1.54μm and 1.06μm rangfinder in the outdoor experiment. *Laser Technique(激光技术)* [J]. 1990, **14**(6): 25 (in Chinese).

[5] 卢常勇, 王小兵, 等. 1.5xμm 波长人眼安全的军用激光测距机及其进展 [J]. *激光与光电子学进展*,

2005, **42**(3): 32-35.

[6] 刘志勇, 李延峰. 人眼安全激光测距机开发探讨 [J]. *四川兵工学报*, 2000, **22**(1): 35-36.

[7] 张承铨. *国外军用激光仪器手册* [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1989.

[8] 李港. *激光频率的变换与扩展——实用非线性光学技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

[9] 陶宗明, 张寅超, 吕勇辉. Nd : YAG 四倍频激光抽运甲烷后的受激喇曼效应及其物理机制分析 [J]. *物理学报*, 2004, **53**(8): 2589-2593.

[10] 叶震寰, 楼祺洪, 等. 甲烷和氢气混合气体中的多波长喇曼转换 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 677-680.

专利 Patent

非致冷微测辐射热计用 $Cd_{1-x}Zn_xS$ 高性能电阻温度系数材料

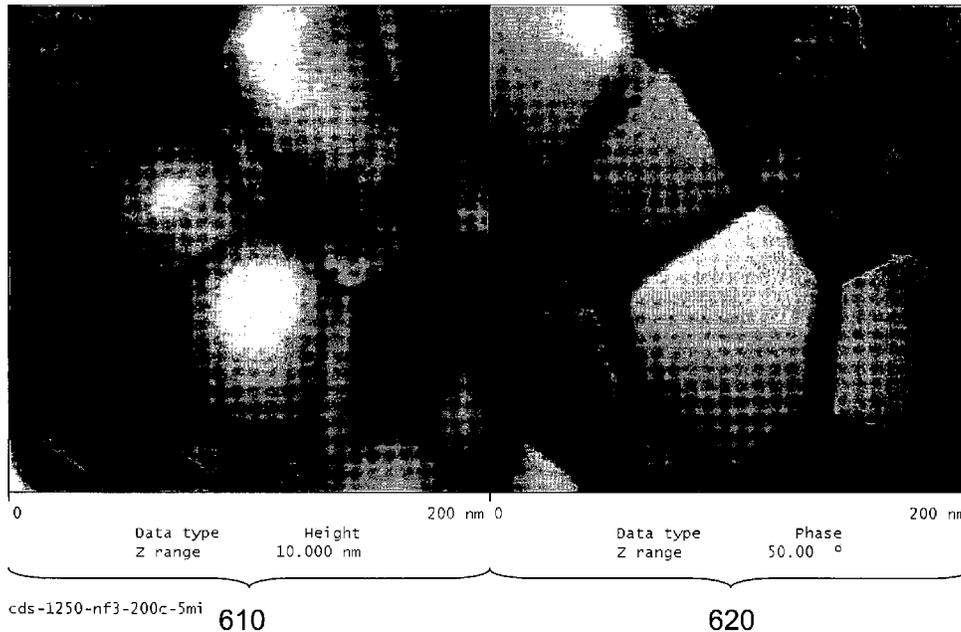
美国专利 US7527999
(2009 年 5 月 5 日授权)

微测辐射热计是一种红外探测器, 它会吸收红外辐射并略微地变热。其电阻是随温度变化的, 因而可以被测量和校正。微测辐射热计最常用的材料有 VO_x 和非晶

硅, 其中非晶硅的动态范围和隔热性能较差, 因此基于非晶硅的微测辐射热计的应用目前仅限于消防方面。

本发明提供一种电阻热系数高达 1.5% ~ 3.7% 的 $Cd_{1-x}Zn_xS$ 薄膜材料。由于具有优良的特性, 它可以在微测辐射热计类非致冷红外传感器中使用。这种薄膜材料可以用 MOCVD、热蒸发或其它技术淀积。它既可以淀积在微测辐射热计膜片上, 又可以淀积在其它晶片上。其特性可以通过控制某些淀积参数和使用不同的退火技术而得到调节。该薄膜工艺可以在与 CMOS 工艺兼容的温度下实施。

本专利说明书共 11 页, 其中有 6 张插图。



高 编 译