

横向脉冲放电硫双原子分子气体 激光介质小信号增益的测量*

吴恒莱¹ 潘状元² 赵卫疆¹ 王 骥¹ 马祖光¹

(¹ 哈尔滨工业大学光电子技术研究所 哈尔滨 150001; ² 哈尔滨理工大学 哈尔滨 150040)

提要 对加反射镜测量放大自发辐射方法测量小信号增益系数的物理模型作了修正。给出了修正后小信号增益系数的计算公式。测量了横向脉冲放电 S₂ 气体激光介质的小信号增益系数, 最大值为 0.082 cm⁻¹。并对计算结果作了分析和讨论。

关键词 硫双原子分子, 激光介质, 小信号增益, 物理模型

1 引 言

小信号增益系数是激光介质的重要指标之一。对它测量的精确与否直接影响对激光介质的认定以及激光器件的设计可靠性。由于 S₂ 激光介质具有高增益属性, 自发辐射噪声很大, 尤其是当放电脉冲在十几纳秒量级时, 这种噪声的干扰不得不采取慎重的态度来处理。对此, 通常选用放置后反射镜测量放大的自发辐射的方法来测量小信号增益系数^[1]。然而, 在测量横向脉冲快放电泵浦的 S₂ 激光介质的增益系数时, 遇到了如下情况: 首先后反射镜难以靠近被测激光介质; 其次外腔式的 S₂ 等离子放电管两端的密封窗片导致了反射光往返于激光介质的不对称性损耗, 该损耗与反射镜的损耗同数量级; 最后由于激光介质的增益区较长, 将探测器放置远远大于这一长度的距离上存在困难。如果利用现成的模型和计算公式, 就难以保证测量精度。于是我们采取了修正手段, 对加后反射镜测量放大自发辐射来计算小信号增益系数方法的已有物理模型进行了修正, 进而推导了适合横向脉冲快放电泵浦的气体激光介质的计算小信号增益系数的公式。利用修正后的模型和公式测量了横向脉冲快放电 S₂ 激光介质的小信号增益系数, 并对计算结果作了分析和讨论。

2 模型及公式

图 1 中, 激光介质分为放电的增益区 GM (长度设为 l , 增益系数设为 g_0 , 吸收系数设为 α_1) 和管脖吸收区 SM (长度设为 d , 吸收系数设为 α_2), 它们的横截面设为矩形, 面积为 $a \times b$ 。由于激光介质是气体, 吸收区直接与放电等离子管的密封窗 W_1 和 W_2 相接, 窗的透过率均设为 T , 厚度忽略。 S_1 为光阑 (通光面积为 S , 距 W_2 的距离为 D); M 为一平面反射镜 (反射率为 R), 它

* 国家自然科学基金资助课题。

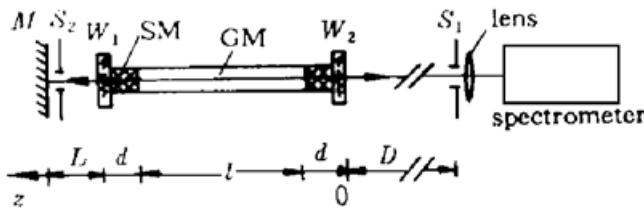


图1 物理模型

M : 反射镜; S_1, S_2 : 光阑; W_1, W_2 : 透射窗;

GM: 激活介质; SM: 吸收介质

Fig. 1 Physical model

M : mirror; S_1, S_2 : stops; W_1, W_2 : windows;

GM: gain medium; SM: absorbing medium

与 W_1 之间的距离为 L (空气的吸收系数设为 α_3)。物理模型假设: 激光介质是均匀的, 泵浦是均匀的, 增益是非饱和的。对自发辐射来说, 宏观激活介质可视为由若干体积为 dV 的微观激活介质元组成^[2]。各介质元对光阑 S_1 光通量贡献 dI 的求和, 就构成了宏观激活介质对光阑 S_1 光通量的总贡献 I

$$I = \int_V dI = \int_V \frac{S}{r^2} \exp(G_0) \rho_0 dV \quad (1)$$

式中, S/r^2 为 dV 介质元对 S_1 所张的立体角, r 为 dV 到 S_1 中心的距离; ρ_0 设为泵浦结束后激活介质的初始体发光强度; $\exp(G_0)$ 为增益因子, 反映从 dV 介质元发出的光在传播到光阑 S_1 的过程中被放大或吸收的情况。

小信号增益系数的计算公式可从(1)式出发推导求得。根据图1的坐标系, 未加反射镜之前有效光阑 S_1 所接收到总光通量 I_1 的具体表达式为

$$I_1 = \rho_0 S T \int_0^a dx \int_0^b dy \int_0^l \frac{\exp[(g_0 - \alpha_1)z - \alpha_2 d - \alpha_3 D]}{x^2 + y^2 + (d + D + z)^2} dz \quad (2)$$

加反射镜后, 还要考虑反射光(介质元发出的光经反射镜反射后进入 S_1 的光)对光通量的贡献。在直射光(介质元发出的光直线射入 S_1 的光)情形和反射光情形中, 同一介质元对 S_1 所张的立体角是不同的。反射光比直射光还多一次反射损耗、两次透射损耗。作了上述考虑后, 同理可求得加反射镜之后有效光阑 S_1 所接收到总光通量 I_2 的具体表达式为

$$I_2 = I_1 + \rho_0 S R T^3 \int_0^a dx \int_0^b dy \int_0^l \frac{\exp[(g_0 - \alpha_1)(z + l) - 3\alpha_2 d - \alpha_3(D + 2L)]}{x^2 + y^2 + (3d + 2l + D + 2L - z)^2} dz \quad (3)$$

用(2)式除(3)式后, 稍加整理得

$$\frac{I_2}{I_1} = 1 + A \frac{\int_0^a dx \int_0^b dy \int_0^l \frac{\exp(g_0 - \alpha_1)z}{x^2 + y^2 + (3d + 2l + D + 2L - z)^2} dz}{\int_0^a dx \int_0^b dy \int_0^l \frac{\exp(g_0 - \alpha_1)z}{x^2 + y^2 + (d + D + z)^2} dz} \quad (4)$$

式中 $A = RT^2 \exp[(g_0 - \alpha_1)l - 2\alpha_2 d - 2\alpha_3 L]$, 此式确定了待求的 g_0 与可测实验参量之间的关系。

将 S_2 激光介质小信号增益系数测量的具体实验参数值 $l = 0.3$ m, $d = 0.08$ m, $L = 0.05$ m, $D = 0.8$ m; $R = 0.923$ ^[3], $T = 0.958$ ^[3] 及 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0.005, \alpha_3 = 0$, 代入公式(4), 然后进行数值计算求得的光强比与小信号增益系数的关系曲线见图2。

3 实验

紧凑型外腔式 S_2 激光器结构如图3所示。放电电路为双 Blumlein 型; 脉冲成形线电容 C_p 和储能电容 C_s 由多个

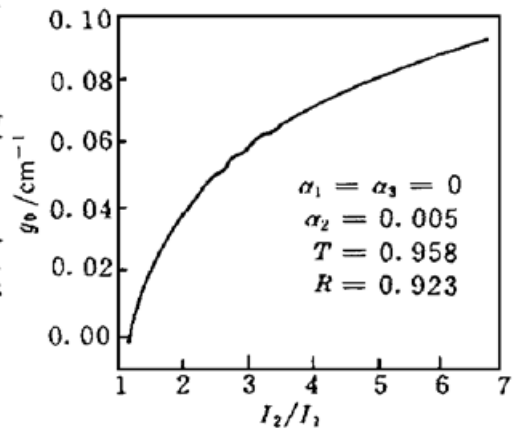


图2 增益系数与光强比

Fig. 2 g_0 vs I_2/I_1

并联的无感电容构成; 闸流管作为脉冲成形线的触发开关; 为获得均匀辉光放电, 采用了线-面电晕预电离机构; 保温层的设置有利均匀温度场的获得, 也是激光器的骨架; 热隔离板是为保护电容器而设置的。

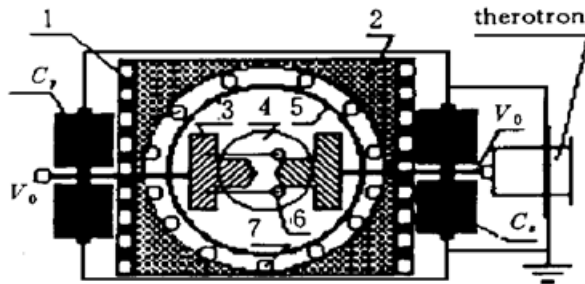


图 3 横向放电 S_2 激光器结构

1: 热隔离器; 2: 保温层; 3: 放电电极;
4: 透射窗; 5: 管壳; 6: 预电离丝; 7: 加热器

Fig. 3 Structure of the transversely discharged S_2 laser

1: heat insulator; 2: insulating layer; 3: electrodes;
4: windows; 5: tube's shell; 6: pre-ionizing silk; 7: heater

增益系数的测量工作是在激光器放电参量优化实验的基础上进行的。通过优化比较, 选择了氩气作为激光介质的缓冲气体, 充气气压为 800 Pa; 等离子体放电管的温度为 423 ± 10 K; 电容配比 $C_s/C_p = 11.48 \text{ nF}/4.56 \text{ nF} = 2.5$; 储能电压 $V_0 = 9.2 \text{ kV}$; 光阑孔径为 6 mm; 荧光的测量采用 Aton 300i 型光谱仪, 见图 1; 它的输出直接馈给 ISTB 型的数据处理系统。图 4 是所测荧光数据的处理结果, 图中 a 是未加反射镜的, b 是加了反射镜的, 纵坐标表示自发辐射荧光的相对强度, 已扣除背景; 横坐标表示波长, 用汞灯定标。

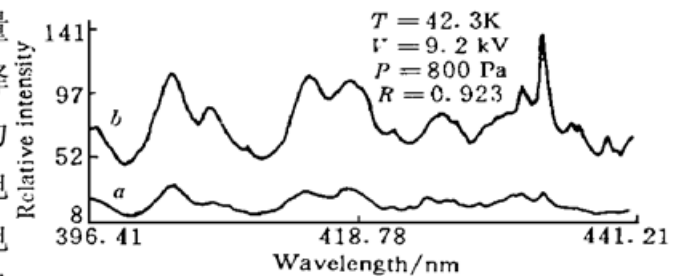


图 4 硫蒸气放电荧光光谱

Fig. 4 Fluorescence spectra from discharged sulfur vapor

根据文献[4]和[5]中提供的 $S_2 B-X$ 态德斯兰表及其荧光光谱数据, 完成了对图 4 中荧光光谱的认定工作及光强比 I_2/I_1 的计算。再根据公式(4)或图 2 中的曲线求出图 4 荧光光谱峰值位置的小信号增益系数汇总于表 1 中, 括弧中的小信号增益系数引自文献[4]。最大小信号增益系数 0.082 cm^{-1} 位于 434.9 nm 附近, 属于 $(v' = 2 - v'' = 12)$ 谱带。

表 1 放电泵浦 $S_2 B \rightarrow X$ 跃迁 g_0 的测量结果

Table 1 Results of g_0 of $S_2 B \rightarrow X$ by discharging

λ/nm	v', v''	g_0/cm^{-1}	I_2/I_1
403.29	0, 10	0.065(0.01)	3.446
414.60	0, 11	0.068	3.501
426.68	0, 12	0.065	3.485
439.30	0, 13	0.075	4.436
397.13	1, 10	0.061	3.214
406.28	1, 11	0.075	4.039
418.12	1, 12	0.065(0.012)	3.751
432.20	1, 13	0.069	3.159
424.30	2, 13	0.063	3.257
434.09	2, 14	0.082	5.217

4 讨 论

1) (4) 式中的 T 因子的出现是对原公式的修正。反映透射窗对光的透射损耗。由于透射窗

两侧的介质不同, 光束相向经过它时, 窗的透过率一般不同, 但这里把它们均认为是 T 。这是一种近似。

2) 图 2 中, 当 $g_0 = 0$ 时, $I_2/I_1 \cong 1.3$, 该值小于 2。这与 g_0 为激光介质增益系数的假设并不矛盾。对于整个器件来说, 净增益系数小于或等于零时, 光强比 I_2/I_1 应小于或等于 2。

3) 关于 $\alpha_1 = 0$ 的根据有三: 首先, $S_2 B-X$ 的激光跃迁具有四能级系统特点。 $S_2 X$ 态的势阱很深, 阱壁很陡, 较高振动态 ($v'' \cong 20$) 的排空效应明显, 来自 $S_2 B-X$ 态的连续光泵浦激光已实现运转, 无瓶颈效应。这使激光下能级被排空得很彻底, 发生在激光下能级的吸收可忽略; 其次, S 原子能级的性质决定了 S_2 分子没有与所测荧光波长范围的来自 $S_2 X$ 态热布居能级的吸收; 第三, 能够反应器件净增益系数的 $I_2/I_1 \gg 1$ 成立, 也可说明激光介质的增益系数 $g_0 \gg \alpha_1$ 。最后要注意的是它们都是波长的函数。所以这种考虑对不满足 $I_2/I_1 \gg 1$ 的波长来说, 再把 g_0 视为激光介质的增益系数就粗略了。

4) 可见光, 取 $\alpha_3 = 0$ 近似。对真空紫外波段的测量, α_3 是真空度的函数, 要视具体情况而定。

5) 图 5 给出了由不同计算公式得到的曲线, 从上到下 a, b, c, d, e 共五条。曲线 c 是 (4) 式的计算结果; 曲线 a 是没考虑透射窗损耗的计算结果。在 $I_2/I_1 = 5.132$ 处, 它比实验结果偏大, 约 0.006 cm^{-1} , 即透射窗不对称损耗引起计算结果误差的数量级。

6) 在 $l = 0.3 \text{ m}$, $D = 0.8 \text{ m}$ 的情况下, 如果忽略 (4) 式中的 z 及 x, y 可以得到如下的小信号增益系数的近似解析表达显式

$$g_0 = \frac{1}{l} \left[\ln \left[\frac{I_2/I_1 - 1}{RT^2} \right] + 2 \ln \left[1 + \frac{2(d+l+L)}{d+D} \right] + 2\alpha_2 d \right]$$

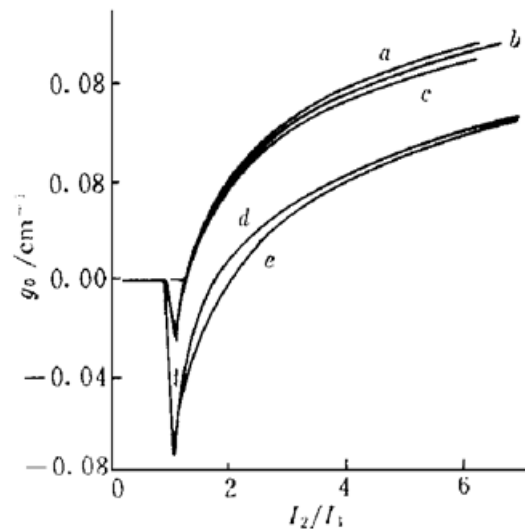


图 5 结果的对比

Fig. 5 Contrast of results

它的结果对应图 5 中的曲线 b 。在 $I_2/I_1 = 5.132$ 处, 它与数值积分结果曲线 c 的偏差约为 0.004 cm^{-1} , 即为忽略激光介质的横向尺寸和积分中取平均立体角近似引起计算结果误差的数量级。

7) 取 $D \gg L, l, d$, 时, 有

$$g_0 = \frac{1}{l} \ln \frac{I_2/I_1 - 1}{RT^2} \quad (5)$$

图 5 中曲线 d 是 $T = 0.958$ 时 (4) 式的结果。曲线 e 是 $T = 1.0$ 时的结果。它们与曲线 c 的偏差相当大, 约 0.025 cm^{-1} 。即点激光介质近似 (忽略激光介质的体积) 和由于后反射镜不能靠近激活介质而放置所导致测量误差的数量级。

8) 透射损耗与反射损耗对计算结果的影响程度相同。 $T \times T = 0.958 \times 0.958 = 0.918$ 和 $R = 0.923$ 同数量级。它们处于公式 (4) 中的同一位置, 故对 g_0 的影响相当, 且不敏感。当 I_2/I_1 在 5.1319 附近时, 忽略透射窗损耗将引起小信号增益系数下降约 0.003 cm^{-1} 。

9) 有效光阑 S_1 孔径的选择要求被测光束满足近轴光学的条件。光阑随 D 值的减小放置, 其孔径的设置也要相应减小。这对减小光强横向分布导致的测量误差、保证物理模型的准确性及提高测量精度是必要的。上述测量中, 激活介质中心对 S_1 的口径角为 5.8 mrad 。

5 结 论

利用修正后加后反射镜测量放大的自发辐射计算小信号增益的物理模型和计算公式, 对快放电泵浦的 S_2 激光介质小信号增益系数进行了测量。结合测量结果对修正的内容所作的误差分析和讨论指出:

1) 在后反射镜难以靠近被测激光介质、存在密封窗片引起的不对称性透射损耗以及探测器不能放置在远远大于被测激光介质长度的距离时, 只要在近轴条件下工作, 修正后的(4)式就能对小信号增益系数作出正确的描述。

2) 在放电激励下的以惰性气体氩作缓冲气体的 S_2 激光介质 $B \rightarrow X$ 跃迁具有广谱增益特性。在图 4 波段内, 在放电泵浦条件下获得 S_2 激光介质 0.082 cm^{-1} 的小信号增益系数。

参 考 文 献

- 1 Ma Zuguang. Experimental Method of Laser (First Edition). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978. 175 (in Chinese)
- 2 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Jiahua. Principle of Laser (First Edition). Beijing: National Defence Industry Press, 1980. 1 (in Chinese)
- 3 Writing Group of Gas Laser. Gas Laser (Book Two) (First Edition). Shanghai: Shanghai People's Press, 1976. 229 (in Chinese)
- 4 Zhonghua Zhang. Research on the radiation of Diatomic Sulfur Excited by Transverse Pulse Fast Discharge. Engineering Doctor Dissertation, Harbin Institute of Technology, 1993. 66
- 5 D. A. Peterson, L. A. Schlie. Stable pure sulfur discharges and associated spectra. *J. Chem. Phys.*, 1980, **73**(4): 1551~ 1566

Measurement of Small Signal Gain of a Gaseous Sulfur Dimer Medium Pumped by Transverse Discharge

Wu Henglai¹ Pan Zhuangyuan² Zhao Weijiang¹ Wang Qi¹ Ma Zuguang¹
 $\left[\begin{array}{l} \text{}^1 \text{Institute of Opto-electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001} \\ \text{}^2 \text{Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040} \end{array} \right]$

Abstract The modification of the physical model for the calculation of small signal gain by measuring spontaneous emission magnified with a mirror is done. The analytical expressions of small signal gain from the model modified are given. The coefficients of the small signal gain of a S_2 laser medium pumped by transverse fast discharge are obtained, and the maximum of g_0 is 0.082 cm^{-1} . And the results are analyzed and discussed.

Key words sulfur dimer, laser medium, small signal gain, physical model