

S₂ 激光器横向脉冲放电特性的研究*

吴恒莱 周晓丽 张中华 孙正和 于俊华

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

提要 研究了 S₂ 激光器横向脉冲放电特性, 分析并解释了影响放电特性的主要因素, 如等离子体温度、充电电压、电容配比及紫外光预电离。

关键词 硫双原子分子, 激光器, 横向脉冲放电

1 引言

连续可调谐蓝绿激光对需要有效匹配及保密性的激光探潜及水下通信来说具有重要的意义。通过分析 S₂B³Σ_g⁻ 和 X³Σ_g⁻ 态势能曲线可知, S₂ 是一种在宽谱区(283 ~ 640 nm)范围内可实现准连续调谐的一种蓝绿激光介质, 并兼有高增益、高效率、低激发阈值特性, 如果采用放电激励, 还兼有非谐振泵浦特性^[1]。低温硫饱和蒸气主要成分为多原子硫分子, 将其解离成为激光介质 S₂ 仅需 0.1 eV 的解离能, 而且利用 7 eV 的电子平均动能就可得到 S₂ 分子的最大电子碰撞激发截面, 这是脉冲放电很容易实现的^[2]。但 S₂ 激光上能级的有效寿命仅为几十个毫微秒^[3,4], 加之高温、高真空及硫蒸气的强腐蚀性, 这就给激光器件的设计带来诸多困难。为了获得大面积的均匀而稳定的辉光放电, 我们采用了横向脉冲快放电的泵浦技术与高压氙灯紫外光预电离技术相结合的措施, 对自行设计的 S₂ 激光器件进行了技术参数的实验研究, 给出了实验结果、理论解释及结论。

2 实验装置

实验原理见图 1。激光器放电电压和电流分别用高压探头(P6015 型)和儒科夫斯基线圈(410 型)探测, 由宽带示波器监测, 照相机记录。放电产生的 S₂ 荧光由 spex1870 单色仪、Boxcar 信号平均器和 X-Y 记录仪监测, KSY-4-16 型温控仪控制激光管的工作温度(200~260℃)。氙灯电源可为双预电离氙灯提供脉冲高压。氙灯电源和 S₂ 激光高压脉冲发生器由双路延迟触发器控制, 以调节氙灯脉冲放电与激光脉冲放电间的时间延迟。

S₂ 激光器结构见图 2。它由激光器腔体和激光放电电路组成。考虑到器件的耐腐蚀性、电绝缘性、真空性和耐热性, 激光器窗片与石英管壁封接采用了光胶合技术, 并采取外腔式结构。预电离采用两只平行氙灯, 灯长为 30 cm, 气压为 53.2 kPa, 电流密度为 1500 A/cm²。激光放电能

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1996-01-02; 收到修改稿日期: 1996-04-08

路采用了 Blumlein LC 反转电路,最高电压可达 20 kV,由高压脉冲发生器产生。激光电极采用了高纯铝质的 T. Y. Chang 电极,尺寸为 $32 \times 3 \times 2$ (cm³),它们与氙灯平行放置。电极与储能电容 C_1 和脉冲形成线电容 C_2 的连接用了十八根多股粗紫铜导线,电路其他部分均以紫铜带连接以减小主放电路的电阻和电感。

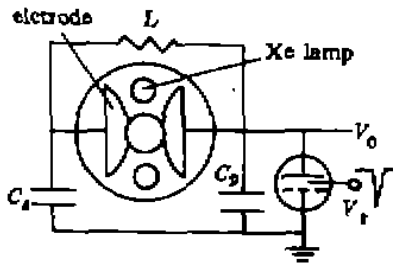


图 2 S₂ 激光器示意图
Fig. 2 Schematic of the S₂ laser

3 实验结果

3.1 气体温度对放电电流的影响

图 3 是在不同放电管温度情况下,放电电流随时间的变化规律。从中可以看出,随放电管温度的增加,脉冲电流峰值增大,脉宽变窄,随后又变低,变宽,即脉冲放电电流波形随温度的增加有一最佳波形存在,这正是我们所期望的。因为硫的蒸气压直接与温度有关。温度低时,硫的蒸气压低。这虽导致 E/P 值的增高,但参与电离的粒子数减少,电流反而上不去;温度过高 E/P 值下降,电离率下降,电流也上不去。所以,电压一定时,有一个合适的温度使电流达到最大值,这也是客观上存在着最佳 E/P 值的反映。

3.2 电容值的对比对电流波形的影响

图 4 是在不同电容值的配比时,记录的电流波形。从图中可以看出,当 $T = 240^\circ\text{C}$, $V_0 = 2400\text{ V}$ 条件下,不同的电容配比 $C_1/C_2 = 3$ 和 $C_1/C_2 = 5$ 时波形幅值相差很大。峰值电流分别为 760 A 和 480 A,脉宽分别为 50 ns 和 25 ns,前者比后者的前沿滞后 10 ns。气体的脉冲放电电流与击穿电压成正比。适当地减小电容量,尤其是 C_1 ,有利提高电压上升率,也就有利提高击穿电压和放电电流;对于 Blumlein 电路,击穿电压可达到充电电压 V_0 的一倍半左右,甚至更高。因此,电容值配比的选择,对快放电电路具有重要意义。

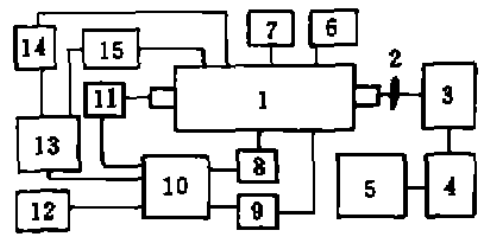


图 1 实验装置示意图

1: S₂ 激光器; 2: 透镜; 3: 单色仪; 4: Boxcar; 5: X-Y 记录仪; 6: 温控仪; 7: 气体混合装置; 8: 儒柯夫斯基线圈; 9: 高压探头; 10: 示波器; 11: 光电变换器; 12: 照相机; 13: 双路延迟触发器; 14: 高压发生器; 15: 脉冲电源

Fig. 1 Experimental apparatus

1: S₂ laser; 2: lens; 3: monochromator; 4: Boxcar; 5: X-Y recorder; 6: temperature controller; 7: gas-mixing unit; 8: Rogowski coil; 9: HV probe; 10: oscillograph; 11: photoelectric transformer; 12: camera; 13: double-circuit delay trigger; 14: HV generator; 15: pulse power supply

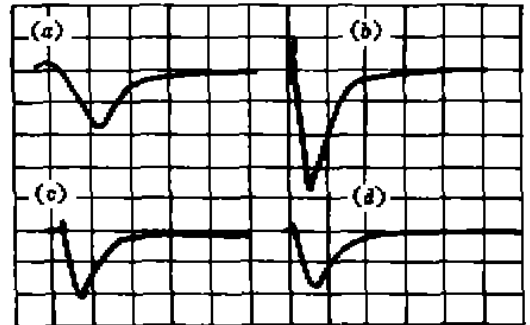
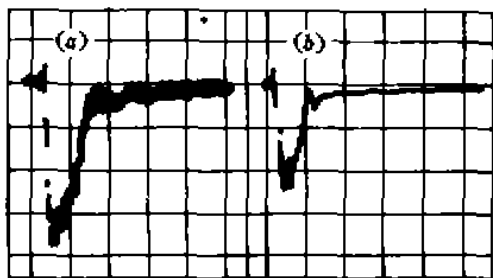


图 3 温度对放电电流的影响

Fig. 3 Influence of temperature on discharge current

(a) $T = 180^\circ\text{C}$, $V_0 = 1500\text{ V}$, $C_1/C_2 = 5$, $\Delta\tau = 0.2660\text{ Pa Ar}$; (b) $T = 200^\circ\text{C}$, $V_0 = 1500\text{ V}$, $C_1/C_2 = 5$, $\Delta\tau = 0.2660\text{ Pa Ar}$; (c) $T = 220^\circ\text{C}$, $V_0 = 2400\text{ V}$, $C_1/C_2 = 5$, $\Delta\tau = 0.2660\text{ Pa Ar}$; (d) $T = 240^\circ\text{C}$, $V_0 = 2400\text{ V}$, $C_1/C_2 = 5$, $\Delta\tau = 0.2660\text{ Pa Ar}$

图 4 C_1 与 C_2 电容的配比对放电电流的影响Fig. 4 Influence of ratio of capacitance C_1 to C_2 on discharge current

(a) $V = 2400$ V, $T = 240^\circ\text{C}$, $\Delta\tau = 0$, $C_1/C_2 = 3$, $C_1 = 8.55$ nF, $C_2 = 2.85$ nF; (b) $V = 2400$ V, $T = 240^\circ\text{C}$, $\Delta\tau = 0$, $C_1/C_2 = 5$, $C_1 = 5.70$ nF, $C_2 = 1.14$ nF

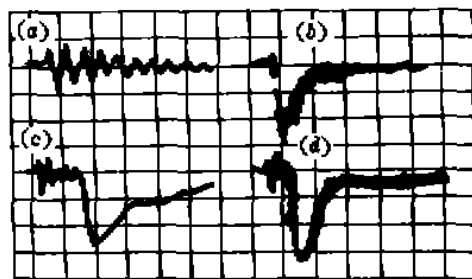


图 5 预电离对放电电流的影响

Fig. 5 Influence of preionization on discharge current

(a) $V_0 = 1500$ V, Xe lamp off, 2660 Pa Ar, $T = 200^\circ\text{C}$, $\Delta\tau = 0$, $C_1/C_2 = 3$; (b) $V_0 = 1500$ V, Xe lamp on, 2660 Pa Ar, $T = 200^\circ\text{C}$, $\Delta\tau = 0$, $C_1/C_2 = 3$; (c) $V_0 = 1200$ V, Xe lamp off, 2660 Pa Ar, $T = 150^\circ\text{C}$, $\Delta\tau = 0$, $C_1/C_2 = 3$; (d) $V_0 = 1200$ V, Xe lamp on, 2660 Pa Ar, $T = 120^\circ\text{C}$, $\Delta\tau = 0$, $C_1/C_2 = 3$

3.3 预电离对放电电流的影响

实验中采用了双高压氙灯紫外光预电离技术。图 5 中 (a) 和 (c) 是没加预电离时的放电电流波形, (b) 和 (d) 是加了预电离后的放电电流波形。从中明显看到: 有预电离时, 放电相对提前, 脉宽变窄, 同时放电稳定性得到改善。这是因为预电离初始电子密度增大而导致等离子体动态阻抗下降、放电提前且容易, 随机性减小稳定性提高。又由 $\omega = 1/\sqrt{L_0C}$ 知, 电感 L_0 下降, 谐振频率 ω 上升, 这有利于锐化脉冲前沿及压缩脉冲宽度。

4 横向脉冲放电激励的 S₂ 荧光光谱分析

通过分别改变 S₂ 放电管温度、储能电容器的电压及缓冲气体的种类和气压, 测得横向脉冲放电激励下 S₂ 的荧光光谱。结果发现这些参数的改变对 S₂ 荧光光谱影响很大。S₂ 荧光强度随放电管的温度的上升出现明显的由弱到强, 又由强到弱的现象。由弱变强阶段, 粒子数密度较低, S₂⁺-S₂ 碰撞猝灭占次要地位, 这时多原子硫分子的热解离使 S₂ 粒子数密度增加决定着荧光强度的规律。当 S₂⁺-S₂ 碰撞猝灭机制与多原子硫分子解离机制对荧光强度影响达到平衡时荧光强度达到最大值, 此时测得最佳 E/P 值为 280 V/cm。随管温度的再增加, S₂⁺-S₂ 碰撞猝灭机制逐渐占主导地位, 使 S₂ 荧光强度下降。与此同时也发现了荧光强度随温度增加向长波移动的现象, 这可通过下能级 $X^3\Sigma_g^-$ 态较高振-转能级的粒子数布居随温度增加而增加的规律及 S₂B³ Σ_g^- 相对于 $X^3\Sigma_g^-$ 态极小核间距右移 0.0261 nm (这使最可几跃迁几率稍右移) 得到解释。这也是 S₂ 作为激光介质具有温度调谐特性的物理根据。当只改变储能电压时, 发现 S₂ 荧光谱带总体增高, 而没有各别谱线相对其他谱线在幅度上有显著提高的现象。这是由放电激励的非谐振特性决定的, 这也说明了放电激励具有广谱激励的特点。在分别加入 He, Ne, Ar 几种缓冲气体后, 发现 Ar 的作用显著使谱带内的谱线数量增多, 这有利于实现 S₂ 激光准连续可调谐。

5 结 论

5.1 预电离对放电电流的影响

从实验得知,双氙灯 UV 预电离可使放电时间提前、电流波形稳定,而且电流脉冲前沿变陡,脉宽变小。这归结于预电离所产生的初始电子密度的作用。

5.2 充电电压 V_0 对放电电流 I 的影响

适当地提高 V_0 可使脉冲前沿变陡、脉宽变窄、峰值提高。这归结于提高 V_0 值,就意味着增加等离子体的 E/P 值,这有利于氙原子的电离,多原子硫分子的解离及 S_2 的激发。

5.3 放电管温度对放电电流的影响

存在着最佳的加热温度 T_{opt} ,它使硫饱和蒸气粒子数密度达到合适值,利于提高电离率及获得 S_2 的解离率和激发率。

5.4 电容配比 (C_s/C_p) 对放电电流的影响

实验结果表明,存在最佳 $(C_s/C_p)_{opt}$ 值,它对应最小电流脉宽、最陡前沿、最大幅值。这归结于 $I_m \approx V_i \sqrt{C/L}$, 及 $dV_i/dt \approx V_0 \sqrt{L/C}$ 的综合影响(其中 V_i 为等离子体放电管的击穿电压; $C = (C_s C_p)/(C_s + C_p)$; L 为等离子体管放电回路及所有的杂散电感; I_m 为脉冲放电电流峰值)。

参 考 文 献

- 1 K. J. N. Badura, J. T. Verdeyen. Radiative efficiencies of radio frequency sulfur discharges. *IEEE. J. Quant. Electr.*, 1985, Q-E21(7): 748~750
- 2 张中华,唐 晨,张 华等. 横向光泵获得 S_2 紫外激光. *中国激光*, 1995, A22(3): 165~167
- 3 C. R. Quick, Jr., Ralph E. Weston, Jr. Fluorescence excitation spectra, lifetimes and quenching of $S_2B^3\Sigma_u^-$ in the wavelength region 280~315 nm. *J. Chem. Phys.*, 1981, 74(9): 4951~4954
- 4 Stephen. R. Leone. Optical and discharge studies of novel electronic transition laser species. AD A059979 (1978)

Study of characteristics of transverse pulse discharge S_2 laser

Wu Henglai Zhou Xiaoli Zhang Zhonghua Sun Zhenhe Yu Junhua

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract Characteristics of a transverse pulse discharge S_2 laser have been studied. Influence of parameters of the S_2 laser on the discharge current, such as plasma-tube temperature, discharge voltage, the ratio of C_s to C_p , and preionization has been presented and analysed.

Key words sulfur dimer, laser, transverse pulse discharge