

窄脉冲宽调谐调 Q Cr·LiSAF 激光器 及其应用研究

洪 伟¹ 贺渝龙¹ 是度芳¹ 王正林² 谢建平³

(¹华中理工大学物理系 武汉 430074;

²中国科学院安徽光机所 合肥 230031; ³中国科技大学物理系 合肥 230029)

提要 研究了窄脉冲宽调谐调 Q Cr·LiSAF 激光器的输出特性,在峰值波长 850 nm 附近获得了单脉冲能量为 214 mJ,脉宽为 20 ns 的稳定调 Q 输出,线宽小于 0.2 nm。分析了 Cr·LiSAF 激光器中影响调 Q 的因素和晶体损伤问题,研究了基于 Cr·LiSAF 的双波长可调谐激光器在差分吸收激光雷达中的应用。

关键词 Cr·LiSAF, 调 Q , 差分吸收激光雷达

1 引 言

Cr³⁺·LiSrAlF₆(Cr·LiSAF) 作为一种新型电子振动型激光介质,自从 1989 年 S. A. Payne 等首次报道其激光产生以来^[1],受到了国内外的广泛关注。Cr·LiSAF 晶体具有独特的光谱特性:一方面,它具有宽广的发射谱(750 nm~ > 1 μm),且发射截面较大,π 方向峰值发射截面达 $4.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ^[1],可以与 Ti·sapphire 晶体相媲美;另一方面,它具有宽广的吸收带,可以与标准 Xe 灯的输出很好匹配,而且上能级寿命较长,约为 67 μs^[1],因而可以用闪光灯有效地抽运。随着 Cr·LiSAF 晶体生长和研磨技术的不断完善,已经可以获得大体积、高光学质量的激光棒,Cr·LiSAF 激光器的应用研究也随之迅速发展起来。采用闪光灯抽运的全固态 Cr·LiSAF 激光器结构紧凑,满足了移动式和小型化的要求,在近红外波段它还有宽广的调谐输出,采用谐波技术可以使输出波段扩展到蓝光到紫外,从而使其应用于激光医疗、大气污染监测等领域。

较大的发射截面和足够长的上能级寿命能提供有效的快脉冲能量提取,而且 Cr·LiSAF 晶体具有负的折射率温度系数,因而晶体棒的热透镜效应很小,再加上它的非线性折射率系数也比较小,约为 Ti·Sapphire 的 1/3~ 1/4^[2],因此 Cr·LiSAF 激光器中不易出现因大范围自聚焦而引起的光束畸变和棒的损伤,这些对于调 Q 运行都是非常有利的。

国内外文献报道了闪光灯抽运调 Q Cr·LiSAF 激光系统的运转。M. Stalder 等最先报道了灯抽运 Cr·LiSAF 激光器的调 Q 运转,他们采用转镜调 Q 获得了单脉冲能量 150 mJ 的输出,脉宽为 40~ 50 ns,调谐范围为 780~ 1010 nm^[3]。H. H. Zenie 等报道了灯抽运电光调 Q Cr·LiSAF 激光振荡-放大系统,在 860 nm 获得了单脉冲能量为 400 mJ,线宽为 0.13 nm 的近衍

射极限激光输出^[4]。国内 Cr·LiSAF 激光器的研究还处在起步阶段。中国科学院安徽光机所王爱华等最先报道了闪光灯抽运 Cr·LiSAF 激光器的可调谐输出^[5], 本实验小组曾报道了闪光灯抽运电光调 Q Cr·LiSAF 激光器的输出特性, 并获得了单脉冲能量为 85 mJ, 脉宽为~ 50 ns 的输出, 采用双折射滤光片调谐, 波长在 810~ 890 nm 范围内可调^[6]。

本文报道闪光灯抽运电光调 Q 窄脉冲宽调谐 Cr·LiSAF 激光器的输出特性, 讨论了调 Q 晶体电压、调 Q 延时及一些光腔参数对调 Q 质量的影响, 及 Cr·LiSAF 晶体的损伤问题, 并介绍了基于 Cr·LiSAF 的双波长可调谐激光器在差分吸收激光雷达系统中的应用。

2 实验装置

闪光灯抽运调 Q Cr·LiSAF 激光器的光路图如图 1 所示。

实验中采用了安徽光机所研制的可控硅触发逆变开关激光电源, 储能电容 $C = 200 \mu\text{F}$, 最大输出能量为 121 J, 放电脉冲宽度约为 110 μs 。Xe 灯尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 和尺寸为 $\phi 6 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的 Cr·LiSAF 棒一起封装在有效腔长为 80 mm 的金属双椭圆聚光腔中。2% (at-%) 掺杂的 Cr·LiSAF 棒具有好的光学质量, 且晶体的 C 轴垂直于激光腔的光轴, 这样的 C 轴取向是考虑到 Cr·LiSAF 晶体的发射谱具有强烈的偏振特性, π 方向 ($E // C$) 的发射截面约为 σ 方向 ($E \perp C$) 的 3 倍^[1], 也正因为如此, Cr·LiSAF 激光器可以在腔内无偏振器件时产生偏振度极高的偏振光。棒两端磨成平行平面, 并镀以 800~ 950 nm 波段的宽带增透膜, 其剩余反射率小于 1%。另外, 在安装激光晶体时, 还应使 C 轴置于调谐棱镜的入射面内, 以减少棱镜表面的损耗。采用去离子循环水对 Cr·

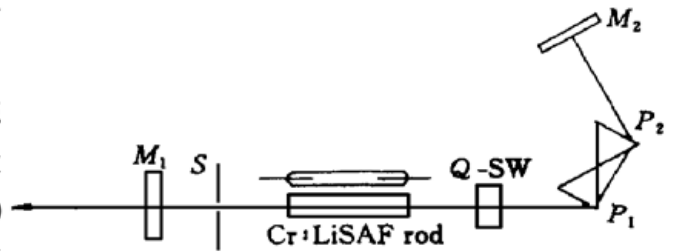


图 1 闪光灯抽运调 Q Cr·LiSAF 激光器光路示意图

M_1 : 输出镜; M_2 : 全反镜; Q-SW: $\text{KD}^* \text{P}$ 晶体 Q 开关;

P_1, P_2 : ZF5 60° 棱镜; S: 可变光阑

Fig. 1 Setup of Q-switched Cr·LiSAF laser pumped by flashlamp

M_1 : output coupler; M_2 : reflective mirror; Q-SW: $\text{KD}^* \text{P}$ crystal

Q-switching; P_1, P_2 : ZF5 60° prism; S: variable diaphragm

LiSAF 棒进行冷却。由于 Cr·LiSAF 晶体有水解现象, 棒不宜长期浸泡在水中, 系统不工作时应放掉聚光腔中的水。据报道, 水和乙二醇按 1:1 混合作为冷却液可以减小 Cr·LiSAF 晶体的水解速度; 采用 pH 值为 7.0 的去离子水溶液还可以使其水解速度进一步降低^[7]。

激光腔为平凹腔结构, 腔长约为 60 cm, 如图 1 所示。实验中输出镜 M_1 有三组不同的膜片可供选择: 760~ 920 nm, $R = 50 \sim 60\%$; 850~ 1000 nm, $R = 75\%$; 780~ 930 nm, $R = 80 \sim 90\%$ 。S 为可变光阑, 可以控制腔内横模损耗以获得基模输出。 $\phi 12 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ 的 $\text{KD}^* \text{P}$ 晶体封装在窗片镀有增透膜的晶体盒中以防潮解, $\text{KD}^* \text{P}$ 晶体

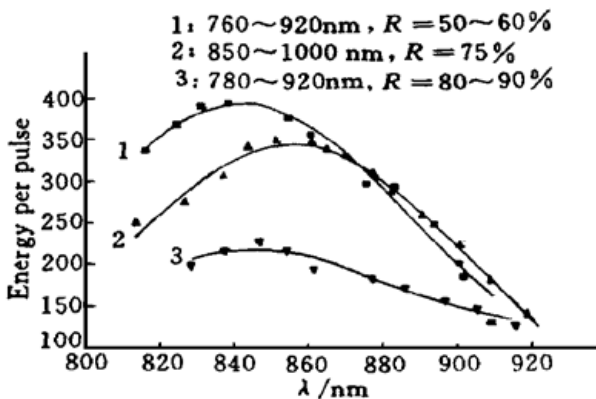


图 2 静态工作条件下针对三组不同的输出镜的波长调谐曲线

Fig. 2 Tuning curve for three output couplers under static operation mode

以纵向方式工作。两块 ZF₅ 60°色散棱镜以接近 Brewster 角放置在光路中, 采用两块棱镜可以起到进一步压窄线宽的作用。 M_2 为 800~ 950 nm 波段的全反镜, 曲率半径为 3 m, 可以由步进马达带动, 对棱镜色散后的光束进行扫描, 从而产生调谐输出。

静态条件下, 对于三组不同的输出镜, 激光器输出的单个激光脉冲能量与输出激光波长的关系曲线如图 2 所示, 波长测量采用光栅单色仪, 测量误差小于 0.2 nm。其调谐范围受到各自输出镜所镀膜层的波长范围限制。

3 Cr·LiSAF 激光器的调 Q 运行及窄脉冲的获得

要获得高效率的调 Q, 除了必须使调 Q 晶体的 x 轴或 y 轴与激光的偏振方向一致外还必须精确控制 Q 开关打开相对于抽运触发的延迟时间。如果 Q 开关打开早了, 上能级反转粒子数尚未达到最大值就开始起振, 会使输出功率降低, 而且可能产生多脉冲; 相反, 如果 Q 开关打开晚了, 上能级反转粒子数会因为自发辐射等原因被损耗掉, 也会造成输出功率下降。

其次, KD*P 晶体在实际应用中由于电极分布不均、晶体内电场的不均匀性及其他因素的影响, $\lambda/4$ 电压的实际值与理论值有很大差异, 因此, 实际操作时必须调节 KD*P 晶体上所加的电压以达到良好的开关效果。

又由调 Q 的速率方程理论可知: 调 Q 脉冲的脉宽正比于光腔中的光子寿命 τ_r , 而

$$\tau_r = \frac{L}{\delta \cdot c}$$

其中 L 为光腔的光学长度, δ 为单程损耗, c 为光速。所以为了获得窄的脉冲, 激光腔的腔长不宜过长, 输出损耗不宜太小。实验系统中, 腔长约为 60 cm, 输出镜有三组具有不同波段透过率的膜片可供选择, 可以通过实验确定使用何种透过率的输出镜。

另外, 由于光抽运系统的聚光作用, 对工作物质的激励是非均匀的, 中心处的反转粒子数密度较大, 离中心越远处, 反转粒子数密度越小。由速率方程理论可知: 调 Q 输出的脉宽与初始反转粒子数密度成反比, 因此, 工作物质不同部分产生的脉冲宽度会有所不同, 离中心越远处产生的脉冲宽度越宽, 从而造成总输出脉冲的宽度加大, 输出功率降低。系统中的小孔光阑 S 除了有控制横模的作用外, 对压窄输出脉宽也有一定的作用。

我们仔细调整了调 Q 电压、延时、光腔参量等影响调 Q 的因素, 在 Xe 灯电压为 1100 V, 放电脉宽为 110 μ s, KD*P 晶体上所加 $\lambda/4$ 电压为 3800 V, Q 开关打开延迟时间为 80 μ s 的条件下, 获得了稳定的调 Q 输出, 脉冲输出重复率为 1 Hz。输出波长在 850 nm (Cr·LiSAF 的中心波长) 处, 用光电倍增管-示波器系统测得脉宽为 20 ns, 用能量计测得输出能量为 214 mJ, 能量波动小于 5%。采用美国 Burland 公司出品的波长计测得其线宽小于 0.2 nm。

4 Cr·LiSAF 晶体的损伤问题

很多资料表明, Cr·LiSAF 晶体是一种机械性能较差, 损伤阈值较低的晶体。我们的实验也证实了这一点。

在进一步调整调 Q 电压、延时、光腔参量等影响调 Q 脉宽的参数后, 获得了脉宽为 14 ns 的调 Q 脉冲输出, 但不久发现棒出现了损伤: 棒体中有一些损伤点, 输出端面附近出现了自聚焦损伤点, 两个端面的膜层也被打坏。关于 Cr·LiSAF 晶体损伤的原因分析如下:

(1) 棒中散射中心或杂质离子(主要是 Pt 离子)的存在是造成体损伤的主要原因,另外,若棒中存在较大的热应力,还会造成断裂损伤;

(2) 棒端面膜层不均匀或棒表面及棒套内壁不光滑或不清洁引起的散射,以及系统内光学元件表面的后向反射是造成端面损伤的主要原因;

(3) 光腔内光束相互之间发生干涉产生与光强有关的折射率变化从而产生小范围的自聚焦,因局部热点处光功率密度超过晶体的损伤阈值,也会造成棒的损伤。

实验表明,Cr·LiSAF 晶体的光学损伤问题是限制其获得更窄脉宽、更高峰值功率的最主要因素。在实际的灯抽运调 Q Cr·LiSAF 激光系统中,除了采用光学质量好、掺杂浓度低、长度较长的棒;保持系统中各元件表面的清洁;使闪光灯抽运的放电脉宽尽可能与 Cr·LiSAF 晶体的上能级寿命相匹配外,还应考虑采用振荡-放大结构,使振荡级以较小的功率密度运转,以获得较好的调 Q 输出参数,并避免晶体受到损伤,通过行波放大可以获得大能量的调 Q 输出。

5 双波长可调谐 Cr·LiSAF 激光器在差分吸收激光雷达系统中的应用

用于大气测污的差分吸收激光雷达系统要求一个宽调谐、双脉冲、双波长的激光光源,且对激光脉冲的能量、脉宽、线宽、光束质量及双脉冲的时间间隔都提出了很高的要求:(1) 要求光束发散角小于 1 mrad;(2) 要求输出激光的线宽小于 0.1 nm,脉宽小于 30 ns;(3) 要求双波长的间隔时间不大于 50 ms;(4) 单脉冲能量不能太小,一般要求有几个毫焦耳。

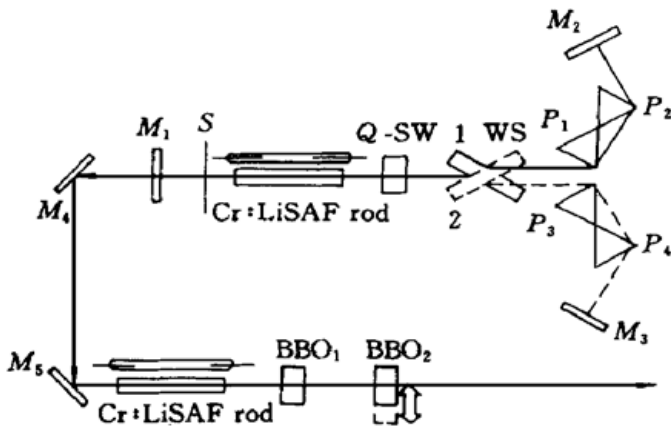


图 3 双波长调 Q Cr·LiSAF 激光系统示意图

M_1 : 输出镜; M_2, M_3 : 全反镜; M_4, M_5 : 反射镜; $P_1 \sim P_4$: ZF5 60° 棱镜; S: 小孔光阑; Q-SW: KD^* P 晶体 Q 开关; WS: 波长选择器

Fig. 3 Schematic diagram of dual-wavelength output based on Q-switched Cr·LiSAF

M_1 : output coupler; M_2, M_3 : total reflective mirror; M_4, M_5 : reflective mirror; $P_1 \sim P_4$: ZF5 60° prism; S: diaphragm; Q-SW: KD^* P crystal Q-switching; WS: wavelength selector

更为紧凑。图中, M_1 为输出镜; S 为可变光阑; Q-SW 为 KD^* P 晶体 Q 开关; M_2, M_3 为曲率半径为 3 m 的全反镜, 均可由步进电机带动转动以实现调谐; 四个 ZF5 60° 色散棱镜均以近 Brewster 角置于光路中; 全反镜 M_4 和 M_5 起转折光路的作用。

为了获得双脉冲双波长的输出, 系统中引入了一个可由直流电机带动旋转的平行平板作

在前面所述 Cr·LiSAF 激光器的基础上, 我们已经设计出一套用于车载双端长程差分吸收雷达的激光系统, 可用于测量大气中两种主要污染物 NO_2 和 SO_2 的浓度, 其光学系统如图 3 所示。选择的 NO_2 和 SO_2 差分吸收特征波长分别为 448.1 nm (吸收峰值波长 λ_{on}) 和 449.8 nm (吸收底值波长 λ_{off}), 及 300.05 nm (吸收峰值波长 λ_{on}) 和 299.3 nm (吸收底值波长 λ_{off})。可以用调 Q Cr·LiSAF 激光器产生 900 nm 附近的调谐输出, 再利用非线性晶体(如 BBO)的二倍频和三倍频效应使输出波段分别达到 450 nm 和 300 nm 附近, 从而获得 NO_2 和 SO_2 差分吸收的特征波长。

如图 3 所示, 在这一系统中采用了振荡-放大结构, 其中工作于不同波长(分别为 λ_{on} 和 λ_{off}) 的两个振荡腔共用一个激光头使系统

为双波长的切换装置,称之为波长选择器,利用平行平板引起的光束平移使得激光振荡可以在两个腔中分别建立。波长选择器的两个成腔位置(位置 1 和位置 2)均与光轴成 Brewster 角,当波长选择器处于位置 1 时,激光振荡在由 M_1-M_2 构成的腔中建立,产生波长为 λ_{on} 的输出;当波长选择器处于位置 2 时,激光振荡在由 M_1-M_3 构成的腔中建立,产生波长为 λ_{off} 的输出。两个脉冲的时间间隔则由直流电机的转速决定,且在一定范围内可调。

用两块 BBO 晶体分别对放大级的输出进行二倍频和三倍频。考虑到 BBO 晶体的光谱允许范围较小,对于相邻的两个具有微小波长差 ($\lambda_{on}-\lambda_{off}$) 的脉冲,BBO 晶体的方位必须作微小的调整,以满足相位匹配条件,获得理想的谐波转换效率。为了能在双脉冲的间隔时间内完成这一调整,利用 PZT 晶体的电致伸缩,来实现 BBO 晶体方位的迅速切换。系统中各部分的动作均由计算机控制完成。

目前,这一激光系统在 900 nm 附近获得了 ~ 80 mJ 的基波输出,二次谐波(450 nm 附近)的能量大于 5 mJ,三次谐波(300 nm 附近)的能量大于 2 mJ,输出激光的线宽小于 0.2 nm,脉宽小于 30 ns,整个光学系统的调试工作正在进行中。

致谢 本文的实验都是在中国科学院安徽光机所进行的,在此向该所的王佩琳研究员以及给予我们热心帮助和支持的诸位老师表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Stephen A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith *et al.*. Laser performance of $\text{LiSrAlF}_6 \cdot \text{Cr}^{3+}$. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(3): 1051~ 1056
- 2 Paul Beaud. Martin Richardson. Edward J. Miesak *et al.*. 8 TW 90 fs Cr·LiSAF laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(18): 1550~ 1552
- 3 Martin Stalder, Bruce H. T. Chai, Michael Bass. Flashlamp pumped Cr·LiSrAlF₆ laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(3): 216~ 218
- 4 H. H. Zenzie, Y. Isyanova. High-energy high-efficiency harmonic generation from a Cr·LiSrAlF₆ laser system. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(2): 169~ 171
- 5 Wang Aihua, Wei Li, Zhang Shang'an *et al.*. The characteristics of optical spectra and flashlamp pumped tunable lasers in Cr·LiSAF₆ crystal. *Chinese J. Quantum Electron.* (量子电子学), 1995, **12**(2): 217~ 219 (in Chinese)
- 6 Wang Zhenglin, Wang Aihua, Guo Qiang *et al.*. Q-switched Cr·LiSAF laser pumped by flashlamp. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(1): 12~ 14 (in Chinese)
- 7 M. D. Perry, S. A. Payne, T. Ditmire *et al.*. Unusual spectroscopic properties of Cr·LiSAF permit ultrafast pulse generation, energy storage, and diode- and flashlamp-pumping. *Laser Focus World*, 1993, **29**(9): 85~ 92

Narrow-pulse Q-switched Tunable Cr·LiSAF Laser and Its Application

Hong Wei¹ He Yulong¹ Shi Dufang¹ Wang Zhenglin² Xie Jianping³

¹Department of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

²Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

³Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230029

Abstract A narrow-pulse Q-switched tunable Cr·LiSAF laser is reported in this paper. Stable Q-switched output was obtained at 850 nm with energy of 214 mJ per pulse and pulse-width of 20 ns (FWHM) and linewidth less than 0.2 nm. The factors inducing damage of the Cr·LiSAF crystal were discussed, and a dual-wavelength tunable laser based on Cr·LiSAF is studied which can be used in DIAL (differential absorption lidar) system.

Key words Cr·LiSAF, Q-switching, DIAL