

# 基于单波长外腔共振和频技术产生波长可调谐 589 nm 激光及钠原子饱和荧光谱的测量\*

谭巍 付小芳 李志新 赵刚 闫晓娟 马维光<sup>†</sup> 董磊 张雷 尹王保 贾锁堂

(山西大学激光光谱实验室, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

(2012年10月30日收到; 2012年10月30日收到修改稿)

本文基于新型单波长外腔共振和频技术实现了转换效率高、波长可调谐 589 nm 激光的输出, 其中基频光波长分别为 1583 nm 和 938 nm, 和频晶体为周期极化铌酸锂. 在 1583 nm 激光频率被锁定到外部环形腔腔模后, 通过对 938 nm 激光的频率扫描实现了输出功率 4.96 mW, 调谐范围 7 GHz 的 589 nm 激光输出, 并采用声光调制器的伺服反馈技术有效提高了输出功率的稳定性. 最后采用该光源对钠原子在 348—413 K (75—140 °C) 时 D<sub>2</sub> 线的饱和荧光谱进行了测量. 观察到了多普勒背景下钠 D<sub>2a</sub>, D<sub>2b</sub> 以及 Crossover 的亚多普勒结构, 其均可为 589 nm 频率的锁定提供参考信号.

**关键词:** 单波长外腔共振, 和频, 589 nm, 钠原子饱和荧光谱

**PACS:** 42.62.Fi, 42.65.-k

**DOI:** 10.7498/aps.62.094211

## 1 引言

钠原子光谱的测量在一些基础研究及应用领域如: 冷原子分子物理, 激光光谱, 人工导星, 激光雷达等方面有着非常重要的应用<sup>[1-6]</sup>, 而探测光谱的 589 nm 激光源在医疗、通信、食品、化学、军事等方面也有广泛的应用潜力<sup>[7]</sup>. 长期以来基于 589 nm 激光的相关研究大多采用污染严重且难以维护和操控的染料激光源. 为了获得性能更稳定、输出功率更高的黄光激光源, 多个研究小组开展了基于频率转换, 如倍频、和频等的光源研制<sup>[1-4,8-13]</sup>.

和频技术相比于倍频技术虽然结构上较为复杂, 但是在三波相互作用的耦合波方程中相当于增加了一个自由度, 使得基频光波长选择范围更宽. 1962 年 Giordmine 和 Maker 等提出了相位匹配技术, 有效地提高了非线性转换效率, 使得非线性频率转换技术与非线性晶体的理论得到了飞速发展<sup>[14,15]</sup>. 1968 年 Boyd 和 Kleinman 对聚焦高斯光

束的和频效率进行了研究, 分析了获得最佳频率转换效率时高斯光束参量与晶体参数的关系<sup>[16]</sup>. 1997 年 Moosmuller 等利用波长分别为 1064 nm 与 1319 nm 的 Nd:YAG 固体激光器利用单次通过非线性晶体和频产生了 3.4 mW 的连续黄光<sup>[8]</sup>. 2003 年美国空军实验室利用与前者相同波长的注入锁定激光器作为基频光与 LBO 晶体通过外腔相互作用获得了 50 W 的 589 nm 激光, 并将转换效率提高到 55%<sup>[4]</sup>. 2009 年, 法国皮埃尔大学的 Kastler Brossel 实验室同样利用 1064 nm 和 1319 nm 作为基频光源并采用周期极化磷酸钛氧钾 (PPKTP) 晶体实现了高效的和频转换, 其中 1319 nm 的转化效率可达到 90%<sup>[1]</sup>. 2011 年我们基于 Boyd-Kleinman 理论优化了外腔结构, 利用 1583 nm 光纤激光源和 938 nm 锥形放大外腔二极管激光源作为基频光, 采用双波长外腔共振技术和频产生了上百 mW 的钠黄光输出<sup>[17]</sup>.

双波长外腔共振技术由于两个波长基频光的同时无源放大而有效地提高了和频光的输出功率<sup>[1,2,17]</sup>, 然而由于需要级联锁定, 使得和频激光

\* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2012CB921603), 国家自然科学基金 (批准号: 61127017, 61178009, 61108030, 60908019, 61275213, 61205216)、山西省青年科学基金 (批准号: 2010021003-3, 2012021022-1) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: mwg@sxu.edu.cn

的波长扫描具有很大的局限性, 通常只能实现稳定的小幅、低频扫描. 为了提高和频激光频率扫描的稳定性, 同时能获得较高的和频光转换效率, 本文采用了单波长外腔共振技术, 即将 1583 nm 激光的频率锁定到谐振腔腔模, 而让 938 nm 激光自由通过环形腔与和频晶体. 这样只需调谐 938 nm 激光频率就可以实现 589 nm 激光的较大范围和较快速度扫描, 同时不影响 1583 nm 激光与腔的频率锁定. 最后通过对钠原子  $D_2$  线饱和荧光谱的测量对该光源频率及功率稳定性以及频率扫描范围进行了测试.

## 2 实验过程及结果

单波长外腔共振和频产生 589 nm 激光的实验装置如图 1 (a) 所示, 用于和频的基频激光波长分别为 1583 nm 和 938 nm, 前者为丹麦 Koheras 公司生产的光纤激光器 (Boostik C15), 输出功率 500 mW, 线宽小于 0.1 kHz, 由保偏光纤输出线偏振光, 其

$M^2$  因子小于 1.05; 后者为德国 Sacher 公司生产的锥形功率放大外腔二极管激光器, 其最大输出功率约为 600 mW, 线宽约为 2 MHz, 然而其输出激光  $M^2$  因子在水平方向约 3.3, 垂直方向约 2, 为了提高和频输出 589 nm 激光的光束质量且晶体内实现有效聚焦, 实验中通过将其输出光耦合到保偏光纤来实现光束的空间滤波, 输出单模激光功率约 290 mW, 且  $M^2$  因子小于 1.05. 由于该光源为外腔结构, 温度、驱动电流以及外腔腔长的调节都极易产生模式跳变现象, 甚至多模运转, 使得输出激光频率不连续. 另外经过锥形功率放大器放大的光束由于输出种子光的模式跳变, 使得输出光功率的光斑分布发生变化, 因此会造成整形光纤输出功率的变化. 为了提高和频光输出功率, 由聚焦光束的 Bold-Kleimann (B-K) 理论<sup>[16]</sup>可知, 当两束瑞利长度相同的基频光在非线性晶体内重合时, 和频光的输出功率可以表示为<sup>[1,18,19]</sup>

$$P_3 = \gamma_{\text{SFM}} P_1 P_2, \quad (1)$$

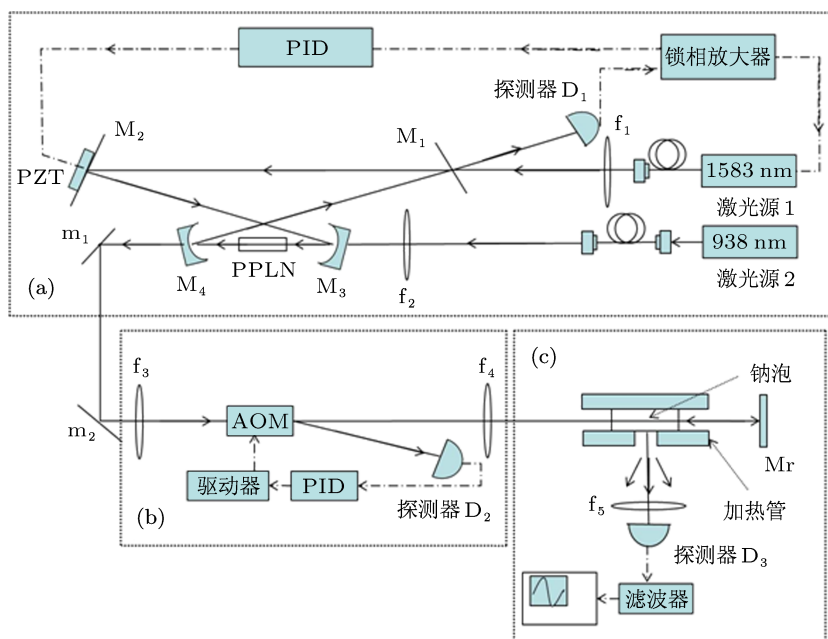


图 1 589 nm 激光产生及钠原子饱和光谱测量实验装置图

式中  $P_3$  为和频光输出功率,  $\gamma_{\text{SFM}}$  为基频光单程通过晶体和频转换效率, 其表达式可以参考文献 [17],  $P_1$  和  $P_2$  分别为两基频光的功率. 基于 (1) 式可知和频光功率正比于两基频光功率的乘积, 因此提高任一基频光功率都可提高和频光的输出功率, 然而当两基频光功率同时提高时则和频光功率以平方率

来增加, 可有效提高输出和频光功率, 这就是采用双波长外腔共振的原因. 外部谐振腔可以使激光在相干条件下实现功率的无源放大, 其放大倍数依赖于外腔的精细度  $F$ <sup>[21]</sup>. 然而本研究需要获得稳定的波长可调谐激光源, 双波长外腔共振采用了频率级联锁定, 在波长扫描时两基频光频率、腔长都要同

步扫描, 因此稳定性是靠增加频率锁定的带宽来保障, 而其带宽的提高受多种因素的限制, 通常很难达到要求, 使得稳定性很差. 考虑到某些应用中波长调谐性能比功率的要求更高时, 就可以通过牺牲输出功率而实现稳定大范围的频率扫描. 本研究采用了单波长外腔共振方案来实现频率的稳定扫描, 同时兼顾了一定程度的功率输出.

实验中采用的外腔为蝶形环形腔, 如图 1(a) 中的  $M_1$ — $M_4$ . 其中  $M_3$  与  $M_4$  是曲率半径为 50 mm 的平凹镜,  $M_1$  与  $M_2$  为平面镜, 总腔长为 404 mm, 长度可以通过腔镜  $M_2$  后的压电陶瓷 PZT 来微调, 自由光谱区为 742 MHz, 其中 1583 nm 和 938 nm 激光分别从  $M_1$  和  $M_3$  两个腔镜输入. 为了达到激光与腔的阻抗匹配, 腔镜  $M_1$  内表面镀有对 1583 nm 透射率为 5.5% 的高反膜, 基本接近腔内其他镜片以及晶体对该激光的损耗, 因此针对 1583 nm 激光腔的精细度约为 50. 非线性晶体采用周期极化铌酸锂 (periodically poled lithium niobate, PPLN), 尺寸为  $5\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高), 极化周期约为  $9.8\text{ }\mu\text{m}$ , 对 1583 nm 和 938 nm 基频光的和频带宽为 2.2 nm 和 1 nm, 对 938 nm, 1583 nm, 589 nm 激光在  $107^\circ\text{C}$  时的折射率分别为 2.320, 2.263, 2.410<sup>[22]</sup>, 有效非线性系数约为  $15\text{ pm/V}$ <sup>[23]</sup>.

1583 nm 线偏振激光束经过匹配透镜  $f_1$  变换后, 从平面腔镜  $M_1$  入射到腔内并与腔达到模式匹配; 为了实现两束基频光在 PPLN 晶体内的有效叠加, 经过光纤整形的 938 nm 激光束通过透镜  $f_2$  变换使其瑞利长度与 1583 nm 激光相同, 然后经凹面腔镜  $M_3$  入射到晶体, 经过计算, 其在晶体入射端面的腰斑半径为  $360\text{ }\mu\text{m}$ , 该光束通过晶体后由  $M_4$  直接透射. 单通 938 nm 激光将与功率腔增强的 1583 nm 激光和 PPLN 晶体相互作用实现有效的和频转换, 并获得 589 nm 激光的输出. 1583 nm 激光与腔模的共振是通过两者的频率锁定来实现, 由于该激光的线宽相比腔模窄百倍, 因此采用直接调制即可以实现稳定的频率锁定. 具体为采用锁相放大器对 1583 nm 激光频率进行 3.6 kHz 正弦波调制, 然后再对调制后的腔模反射信号进行解调, 取其一次谐波作为误差信号经过 PID 控制器后反馈到腔镜  $M_2$  后的 PZT 上, 实现腔模与激光频率的锁定.

为了测试影响和频激光功率的因素, 分别对 589 nm 激光功率与 PPLN 晶体温度以及两基频光功率的依赖关系进行了测量. 图 2 为当 938 nm 和 1583 nm 激光功率分别约为 216 mW 和 500 mW 时,

测量获得的和频光输出功率与 PPLN 晶体温度的关系图, 其中圆点为实验数据, 实线为基于 B-K 理论获得的拟合结果, 可见其符合的很好, 在  $107^\circ\text{C}$  时获得了最高的和频转换效率, 此时输出的最大功率为 3.84 mW. 实验中晶体温度的改变会引起环形腔腔模位置发生变化, 当温度改变较大时就需要两者频率的失锁, 待温度稳定后再进行频率二次锁定, 激光频率将会锁定到与其频率最近的腔模上.

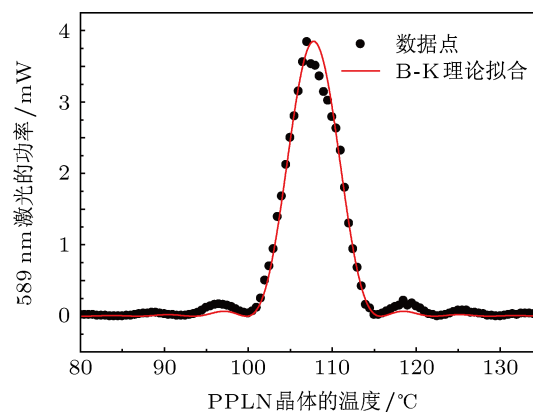


图 2 589 nm 激光功率随 PPLN 晶体温度变化的曲线

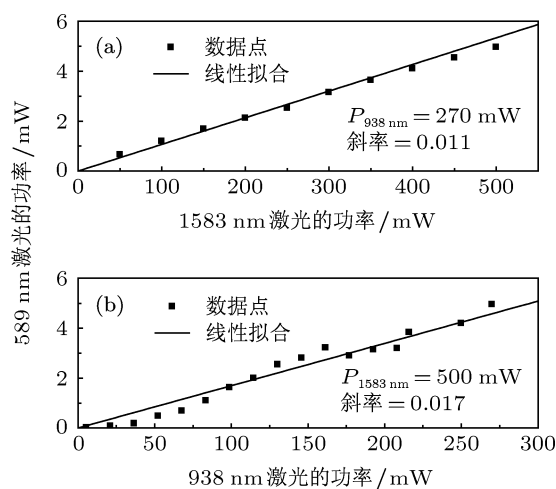


图 3 589 nm 激光功率分别随 1583 nm 和 938 nm 基频光功率的变化曲线

图 3 是测量获得的 589 nm 激光功率分别与两基频光功率的对应关系曲线, 其中两图中点线为测量功率结果, 实线为过零点的线性拟合. 其中图 3(a) 为 938 nm 功率为 270 mW 时, 改变 1583 nm 激光功率获得的测量结果, 可见其被较好的线性拟合, 其斜率为 0.011, 但是当功率大于 400 mW 时, 数据点比线性拟合稍低, 分析其原因可能是由于高功率下基频光转换效率提高, 使其损耗变大, 从而降低了腔的精细度, 使得功率腔增强因子变小<sup>[21]</sup>,

输出激光功率降低. 图 3(b) 为 1583 nm 激光功率为 500 mW 时, 改变 938 nm 激光功率和频光功率的变化图, 可见其也基本满足线性变化关系, 其斜率为 0.017, 然而其数据点偏差较大, 这主要是由于 938 nm 激光的模式跳变有关, 如前所述该激光源为锥形放大外腔二极管激光器, 极易出现主模和边模同时存在的情况, 使得功率的测量不准所致. 综合测量和频光功率与两基频光功率的依赖关系可以得出腔增强的频率转换效率  $\eta_{\text{SFM}} = 0.037 \text{ W}^{-1}$ .

为了实现高的和频光功率输出, 需要调节 938 nm 激光使其光束在腔内完全与 1583 nm 激光重合. 虽然 938 nm 激光是单次依次通过腔镜  $M_3$ 、PPLN 晶体和腔镜  $M_4$ , 镀有高增透膜的腔镜及晶体端面仍然无法实现零反射, 使其在频率调谐过程出现 etalon 效应, 即腔内 938 nm 激光强度周期起伏, 使得输出 589 nm 激光也表现为相同的变化趋势. 如图 2(a) 210 s 前所示为 938 nm 激光扫描时 589 nm 激光光强变化图, 其中图 2(c) 为第 180 s 到 200 s 的放大图, 该 etalon 效应严重的限制了测量光谱的灵敏度. 实验中 938 nm 激光的扫描频率为 0.1 Hz, 频率较低主要为了避免扫描过程中的模式跳变, 扫描范围约 1.4 GHz.

由图可见探测器探测到的激光平均功率约为 1.05 V, 而其功率起伏率约为  $\pm 12.5\%$ , 这样大的幅度起伏将会严重地影响钠池吸收或荧光信号的获取, 尤其是亚多普勒信号的探测, 因此我们进行了基于声光调制器 (acousto optic modulator, AOM) 的功率稳定装置 [20], 如图 1(b) 所示. 从环形腔输出的 589 nm 激光经过会聚透镜  $f_3$  入射到 AOM, 从透射窗口可以观察到其 0 级和 +1 级衍射光, 两部分光的强度由驱动 AOM 的功率来决定. 实验中采用了美国 Crystal Technology 生产的型号为 3080 的 AOM 以及法国 AA 公司生产的型号为 MOD80 功率放大器, 后者输入电压范围为 0 到 5 V, 经过测量两电压下 +1 级衍射光功率对于 589 nm 分别为总功率的 0 和 25%, 基本接近线性响应. 为了实现功率稳定, 将 PID 输出的偏置电压设为 1.9 V, 此时其 0 级光约占总光强的 90%, 该 PID 控制器为美国 SRS 公司的 SIM960. 通过设置 PID 比例增益为 20, 将该信号反馈到 AOM 驱动的输入口, 从而实现了最终的功率稳定. 由图 4(a) 可见, 功率稳定后起伏降低到  $\pm 4\%$ , 噪声得到了有效的控制. 图 4(b) 为功率稳定过程反馈到 AOM 驱动上误差信号的变化图, 锁定前显示为 1.9 V 的偏置电压, 锁定后误差信

号体现为 1.9 V 上下振荡, 为了保护功放, 将输入功放的误差信号限制在 0 到 5 V, 使得无法反馈低于 0 V 的电压, 从而部分影响了最终的功率校正, 如图 4(a) 中的功率信号下方有失锁情形出现, 而在限制电压范围内的误差信号能完全校正功率的起伏.

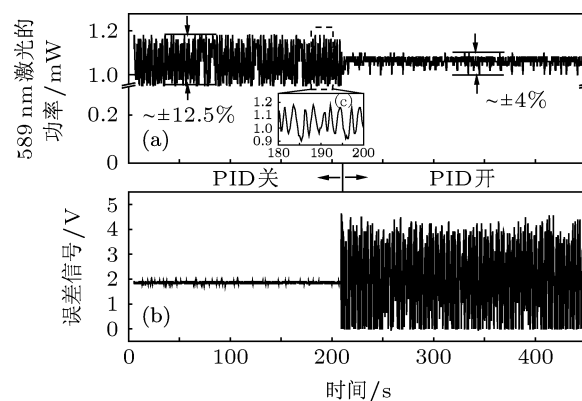


图 4 589 nm 激光基于 AOM 的功率稳定结果图 (a) 为 589 nm 激光功率稳定前后光强变化; (b) 为功率稳定过程中反馈到 AOM 功放的误差信号; (c) 为在功率稳定的第 180—200 s 时 589 nm 激光功率起伏放大图

最后为了检验该和频激光源的特性, 我们对不同温度下的钠原子饱和和荧光谱进行了测量, 测量装置图如图 1(c) 所示. 589 nm 激光穿过钠池后, 再由平面镜  $M_r$  反射, 沿原路返回形成功率比约为 1:1 的光束重叠. 钠泡被置于加热管中央, 通过温度控制器控制该气室温度, 加热管侧面窗口散射出的荧光用透镜收集后, 聚焦到探测器进行探测 [5]. 通过设置 938 nm 的初始波长, 使 589 nm 激光的输出波长位于钠原子荧光谱中心, 图 5 为当入射激光功率约为 3.6 mW 时, 测量获得的温度从 75°C 到 140°C 每隔 5°C 时的饱和和荧光光谱曲线, 其中由左至右出现的小凹陷分别为钠原子  $D_{2a}$  和  $D_{2b}$  的饱和和荧光信号, 中间的突起为 Crossover 信号. 根据两凹陷 1.72 GHz 的固定间隔, 可以估计出该亚多普勒结构谱宽小于 200 MHz, 这主要是由于温度引起的展宽所致.

由图 5 可见, 随着温度上升多普勒背景的峰值由小变大, 主要由原子密度的影响, 气室温度越高, 钠原子密度越多, 荧光的多普勒背景峰值就越高. 而饱和凹陷深度却由小到大再减小, 这是由升温过程中饱和光强变化引起的, 该光强正比于自然展宽的平方 [21]. 在温度低时, 气室内气态钠原子数较少, 使得激光光强远大于饱和光强, 因此饱和信号的幅值随着原子数的增加而增大, 当气室升高到一定温

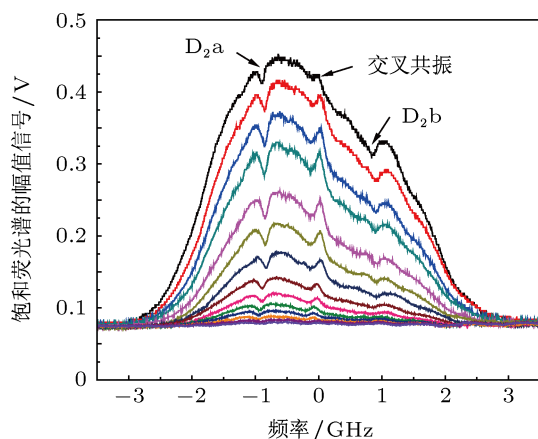


图5 不同钠池温度下钠  $D_2$  线饱和荧光信号 (信号幅度从小到大分别对应  $75^\circ\text{C}$  到  $140^\circ\text{C}$  每隔  $5^\circ\text{C}$  时的曲线)

度时, 激光强度接近饱和光强, 当两者之比为 1.4 时<sup>[20]</sup>, 亚多普勒信号幅度与多普勒背景幅度之比达到最大值. 图中每条荧光谱线还显示有约 0.07 V 的基底背景, 其主要由 589 nm 激光在气室端面反射的杂散光引起, 与频率无关. 对于该光谱的测量, 可以对激光频率进行钠原子  $D_2a$  或  $D_2b$  线的精确

控制, 参考本次测量结果, 当钠原子蒸汽为  $110^\circ\text{C}$ , 可以获得较高信噪比的饱和荧光信号.

### 3 结论

本研究采用 1583 nm 单波长外腔共振技术与单次通过的 983 nm 激光进行和频实现了波长可调谐、功率稳定的 589 nm 激光的输出, 相比于双波长外腔共振具有调谐范围大, 调谐频率高的优点, 其调谐特性主要受 938 nm 激光的影响. 基于该技术获得了 4.96 mW 的 589 nm 激光输出, 通过测量其功率与晶体温度以及和频光功率与两基频光功率的对应关系, 确定出了最佳和频温度为  $107^\circ\text{C}$ , 腔增强和频转换效率  $\gamma_{\text{FSM}} = 0.037 \text{ W}^{-1}$ . 基于 AOM 的伺服反馈技术将输出 589 nm 激光功率由于 etalon 效应引起的  $\pm 12.5\%$  的起伏稳定到了  $\pm 4\%$ . 最后, 测量了不同温度下钠原子的饱和荧光谱, 获得了  $D_2a$ ,  $D_2b$  和 Crossover 等亚多普勒结构, 其可作为锁定 589 nm 激光器频率的参考信号.

- [1] Mimoun E, Sarlo L D, Zondy J J, Dalibard J, Gerbier F 2008 *Opt. Express* **16** 18684
- [2] Mimoun E, Sarlo L D, Zondy J-J, Dalibard J, Gerbier F 2010 *Appl. Phys. B* **99** 31
- [3] Bienfang J C, Denman C A, Grime B W, Hillman P D, Moore G T, Telle J M 2003 *Opt. Lett.* **28** 2219
- [4] Fugate R Q, Denman C A, Hillman P D, Moore G T, Telle J M, LaRue I A D, Drummond J D Spinhirne J M 2004 *Proc. of SPIE* **5490** 1010
- [5] Yan Z A, Hu X, Guo S Y, Cheng Y Q 2009 *Proc. of SPIE* **7382** 738232
- [6] R Q Fugate 1991 *Nature* **353** 144
- [7] Geng A C, Bo Y, Bi Y, Sun Z P, Yang X D, Lu Y F, Chen Y H, Guo L, Wang G L, Cui D F, Xu Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5227 (in Chinese) [耿爱丛, 薄勇, 毕勇, 孙志培, 杨晓冬, 鲁远甫, 陈亚辉, 郭林, 王桂玲, 崔大复, 许祖彦 2006 物理学报 **55** 5227]
- [8] Moosmuller H, Vance J D 1997 *Opt. Lett.* **22** 1135
- [9] Xie S, Bo Y, Xu J, Shen Y, Wang P, Wang Z, Yang F, Peng Q, Cui D Zhang J Xu Z 2011 *Appl. Phys. B* **102** 781
- [10] Zhang L, Lu Y H, Liu D, Tang C, Wang W M, Gao S X 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 1501 (in Chinese) [张雷, 鲁燕华, 刘东, 唐淳, 王卫民, 高松信 2011 强激光与粒子数 **23** 1501]
- [11] Taylor L Feng Y, Calia D B 2010 *Opt. Express* **18** 8540
- [12] Feng Y, Taylor L R, Calia D B 2009 *Opt. Express* **17** 19021
- [13] Yan X J, Li Z X, Zhang Y Z, Wang L, Hu Z Y, Ma W G, Zhang L, Yin W B, Jia S T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104210 (in Chinese) [闫晓娟, 李志新, 张永智, 王乐, 胡志裕, 尹王保, 贾锁堂 2011 物理学报 **60** 104210]
- [14] Giordmine J 1962 *Phys. Rev. Lett.* **8** 19
- [15] Maker P D, Terhune R W, Nisenoff C M, Savage C 1962 *Phys. Rev. Lett.* **8** 21
- [16] Boyd G D, Kleinman D A 1968 *Appl. Phys.* **39** 3597
- [17] Yan X J, Li Z X, Zhang Y Z, Tan W, Fu X F, Ma W G, Zhang L, Yin W B, Jia S T 2012 *Acta Sinica Quantum Optica* **18** 197 (in Chinese) [闫晓娟, 李志新, 张永智, 谭巍, 付小芳, 马维光, 张雷, 尹王保, 贾锁堂 2012 量子光学学报 **18** 197]
- [18] Kaneda Y, Kubota S 1997 *Appl. Opt.* **36** 7766
- [19] Sugiyama K, Kawajiri S, Yabu N, Matsumoto S, Kitano M 2010 *Appl. Opt.* **49** 5510
- [20] Kim D-I, Rhee H G, Song J B, Lee Y W 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 103110
- [21] Foltynowicz A, Ma W G, Schmidt F M, Axner O 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** 1156
- [22] SNLO program, Smith A V, AS-Photonics, <http://as-photonics.com/snlo> [2012.10.24]
- [23] Goldberg L, Burns W K McElhanon R W 1995 *Opt. Lett.* **20** 1280

# The wavelength tunable 589 nm laser output based on singly resonant sum-frequency generation and the measurement of saturate fluorescence spectrum of sodium atom<sup>\*</sup>

Tan Wei Fu Xiao-Fang Li Zhi-Xin Zhao Gang Yan Xiao-Juan Ma Wei-Guang<sup>†</sup>  
Dong Lei Zhang Lei Yin Wang-Bao Jia Suo-Tang

(Laser Spectroscopy Laboratory of Shanxi University, State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Taiyuan Shanxi 030006, China)

(Received 30 October 2012; revised manuscript received 30 October 2012)

## Abstract

A wavelength-tunable laser output at 589 nm with high conversion efficiency based on sum-frequency generation by using the technique of single-wavelength extra-cavity resonance is achieved. The two fundamental wavelengths are 1583 nm and 938 nm and the nonlinear crystal is the period-poled lithium niobate. After the frequency of 1583 nm laser was locked to the cavity mode and the frequency of 938 nm laser was scanned, a 589 nm laser output with power of 4.96 mW and wavelength tuning range of 7 GHz was obtained and the stability of the output power is improved effectively with the help of servo feedback loop technique of acousto-optic-modulator. Finally, based on this laser, the saturated fluorescence spectrum of sodium D<sub>2</sub> line in the temperature range of 348—413 K (75—140 °C) were measured. The Doppler-free structures of D<sub>2a</sub>, D<sub>2b</sub> and crossover lines on Doppler background were observed, which can provide reference signals for the frequency locking of 589nm laser.

**Keywords:** single-wavelength extra-cavity resonance, sum-frequency, 589 nm, sodium atom saturated fluorescence spectrum

**PACS:** 42.62.Fi, 42.65.-k

**DOI:** 10.7498/aps.62.094211

<sup>\*</sup> Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB921603), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61127017, 61178009, 61108030, 60908019, 61275213, 61205216), the Shanxi Natural Science Foundation, China (Grant Nos. 2010021003-3, 2012021022-1).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: mwg@sxu.edu.cn