

铷蒸气四波混频产生蓝紫光激光研究

杨镇^{1,2}, 赵晓红¹, 胡墅², 刘栋², 郭敬为^{2*}, 龚馨慧¹

¹北京邮电大学理学院, 北京 100876;

²中国科学院大连化学物理研究所化学激光重点实验室, 辽宁 大连 116023

摘要 为了研究碱金属铷蒸气激光器中新的波长输出情况及其可能的应用,在铷原子系统中通过 $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2D_{5/2}$ 和 $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2D_{3/2}$ 的双光子激发和四波混频过程产生 358.7 nm、359.1 nm、420.3 nm 和 421.7 nm 四种波长的激光输出,得出了 $6^2D_{5/2}$ 和 $6^2D_{3/2}$ 能级的最佳共振位置以及共振线宽,研究了产生的四波混频激光信号强度随体系温度和泵浦光单脉冲能量的变化情况,发现了当体系温度高于 185 °C 时 $6^2D_{5/2} \rightarrow 6^2P_{1/2}$ 的反常跃迁情况并给出了初步解释。实验结果表明,这种通过铷蒸气四波混频产生蓝紫光激光的技术可以为海洋资源探测、高密度信息存储及水下激光通信等领域提供一种新的激光光源。

关键词 非线性光学; 双光子激发; 铷; 四波混频; 蓝光激光; 紫外激光

中图分类号 O43

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1101002

Four-Wave Mixing Blue-Violet Lasers in Rubidium Vapor

Yang Zhen^{1,2}, Zhao Xiaohong¹, Hu Shu², Liu Dong², Guo Jingwei^{2*}, Gong Xinhui¹

¹School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

²Key Laboratory of Chemical Lasers, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian, Liaoning 116023, China

Abstract In order to study the new wavelength output of the alkali metal rubidium vapor laser and its possible applications, the two-photon excitation and four-wave mixing process of $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2D_{5/2}$ and $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2D_{3/2}$ in the rubidium atomic system produced laser output with four wavelengths of 358.7 nm, 359.1 nm, 420.3 nm, and 421.7 nm, obtained the best resonance position and resonance linewidth of $6^2D_{5/2}$ and $6^2D_{3/2}$ energy levels, and studied the generated four-wave mixing laser. The signal intensity changes with the temperature of the system and the energy of the single pulse of the pump light. An abnormal transition of $6^2D_{5/2} \rightarrow 6^2P_{1/2}$ is found when the system temperature is higher than 185 °C and a preliminary explanation is given. Experimental results show that this technology of generating blue-violet lasers through four-wave mixing of rubidium vapor can provide a new laser source for marine resource exploration, high-density information storage, and underwater laser communications.

Key words nonlinear optics; two-photon excitation; rubidium; four-wave mixing; blue laser; violet laser

OCIS codes 190.7220; 190.4380; 190.2640

1 引言

蓝光激光在水下通信及激光显示技术等领域有着非常广阔的应用前景^[1-3]。产生蓝光激光的常见方法包括:氙离子激光、多种钕激光器倍频^[4-7]、二极管泵浦铯蒸气 895 nm 倍频及蓝光激光二极管^[8-10]等。这些激光器都有着自己的特点以及应用前景,

但是也存在着一一定的局限性:氙离子激光器的效率较低,钕激光器倍频产生的蓝光定标放大性较差,蓝光二极管的单色性及光束质量较差,二极管泵浦碱金属蒸气激光器尚处于研究阶段^[11-13],以及使用二极管泵浦铯蒸气激光器的倍频技术仍不够成熟。因此,开发新的蓝光激光源总是有益的。近期,本课题组分别在铷和铯蒸气中通过双光子激发和四波混频

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-05-15; 录用日期: 2020-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(21973093,61505210)、大连市青年科技之星项目(2018RQ03)、大连化学物理研究所创新研究基金(DICPI201931)

* E-mail: jingweigu@dicp.ac.cn

(FWM)过程中实现了不同波长蓝光激光输出,蓝光的最大转化率达 1.8%^[14-16];而且除了蓝光,还可以产生紫光甚至是紫外激光^[17]。本文利用铷原子高激发态 $6^2D_{5/2}$ 和 $6^2D_{3/2}$ 作为四波混频过程的中间态,分别产生了 358.7 nm 和 359.1 nm 的紫外激光及 420.3 nm 和 421.7 nm 的蓝光激光;通过调节泵浦光波长、单脉冲能量及体系温度等参数,优化了的蓝紫光激光输出条件;同时,当体系温度高于 185 °C 时,发现了 $6^2D_{5/2} \rightarrow 6^2P_{1/2}$ 的反常跃迁并给出了初

步解释。

2 基本原理与实验装置

2.1 基本原理

图 1 为铷原子的能级以及双光子激发和四波混频过程分析。其中,图 1(a)为通过 $6^2D_{5/2}$ 能级产生 358.7 nm 和 420.3 nm 两种四波混频激光的过程;图 1(b)为通过 $6^2D_{3/2}$ 能级产生 358.7 nm、359.1 nm、420.3 nm 和 421.7 nm 四种四波混频激光的过程。

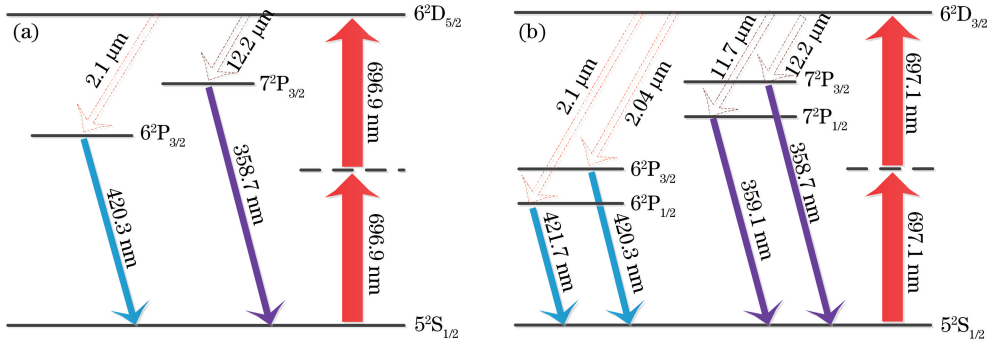


图 1 Rb 四波混频过程示意图。(a)以 $6^2D_{5/2}$ 能级为中间态;(b)以 $6^2D_{3/2}$ 能级为中间态

Fig. 1 Schematic of FWM processes in Rb. (a) $6^2D_{5/2}$ state as intermediate state;

(b) $6^2D_{3/2}$ state as intermediate state

在图 1(a)中,基态铷原子吸收两束波长为 696.9 nm 的光子被激发至 $6^2D_{5/2}$ 能级;由于 $6^2P_{3/2}$ 和 $7^2P_{3/2}$ 能级的初始粒子布居数为 0, $6^2D_{5/2}$ 与这两个能级之间可以形成粒子数反转,从而可能形成 $6^2D_{5/2}$ 向这两个能级跃迁的受激放大的自发辐射 (ASE)。泵浦光的双光子与 ASE 通过四波混频过程产生 358.7 nm 和 420.3 nm 两种波长四波混频激光。在图 1(b)中,同理输出 358.7 nm、359.1 nm、420.3 nm 和 421.7 nm 四种波长的四波混频激光。

2.2 实验装置

实验装置如图 2 所示。采用 Beamtech 公司 SGR-20 Nd:YAG 激光器 532 nm 激光泵浦德国

Fine-adjustment 染料激光器,并且使用“LDS698-乙醇”染料溶液输出 697.17 nm 激光,经 $f = 300$ mm 透镜聚焦后射入热的真空 Rb 池并与 Rb 蒸气相互作用。在与 697.17 nm 泵浦光共线方向上测量了经铷池前向出光口反射后的跃迁谱线。实验采用的 697.17 nm 激光线宽为 0.1 cm^{-1} ,脉冲宽度为 10 ns,单脉冲能量在无特殊说明的情况下为 1.4 mJ,采用的是真空密封石英样品池,内部充入少量金属 Rb,样品池内无任何缓冲气体,Rb 池长度为 20 cm;在无特殊说明的情况下,体系加热温度为 160 °C,此时的饱和蒸气压为 0.98 Pa。为了确保收集到的信号为方向性非常好的四波混频激光而非荧光,设置的反射屏距离铷池 0.5 m。使用 HORIBA

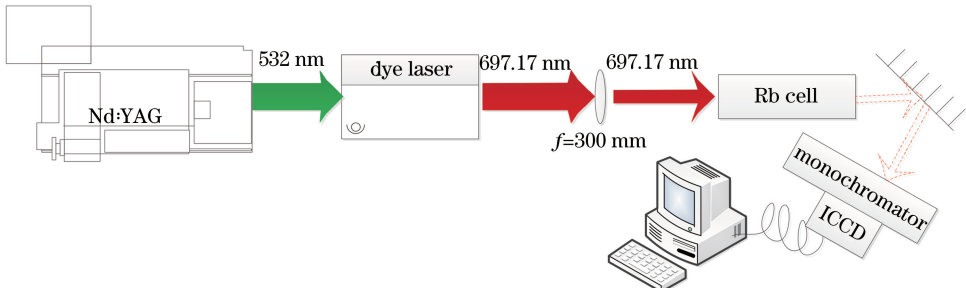


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental setup

公司 DFHR1000 双级联用光栅光谱仪(光谱分辨率为 0.01 nm),并通过光纤耦合采集反射屏的散射光。在收集荧光信号时,光纤头放置在铷池外距离染料光焦点最近的位置,以提高荧光收集效率。信号强度通常采用 100 个激光脉冲产生的光强度信号的平均值。

3 实验现象及分析

3.1 四波混频激光信号强度随泵浦光波长变化

在 696.94~697.05 nm 范围内,以 0.005 nm 为步长对泵浦光进行波长扫描,记录在不同泵浦光波长下采集到的 420 nm 和 358 nm 四波混频激光信号峰值强度及二者强度和,得到四波混频激光信号强度随泵浦光波长变化情况,如图 3 所示。

从图 3(a)中可以看出,泵浦光的最佳双光子共振位置位于 697.030 nm 和 696.980 nm,分别对应着 $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2D_{3/2}$ 和 $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2D_{5/2}$ 两种双光子激

发;使用 NIST 中数据计算 $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2D_{3/2}$ 和 $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2D_{5/2}$ 两种双光子激发波长值分别为 697.17 nm 和 697.12 nm,与实际双光子激发所需波长值相差均为 +0.14 nm。当泵浦光波长扫描至 696.950~697.000 nm 和 697.015~697.040 nm 之间时,出现 420 nm 和 358 nm 四波混频激光信号;在 697.030 nm 和 696.970~696.985 nm 之间时,420 nm 四波混频激光信号强度要显著强于 358 nm。以 $6^2D_{5/2}$ 能级相关的四波混频为例来说明 420 nm 和 358 nm 光的相对强度。四波混频光的强度正比于泵浦激光强度的平方与 ASE 光强度的乘积。而 ASE 光的强度正比于相应跃迁的 Einstein 系数。因此,358 nm 和 420 nm 四波混频的强度正比于 $6^2D_{5/2} \rightarrow 7^2P_{3/2}$ 和 $6^2D_{5/2} \rightarrow 6^2P_{3/2}$ 两个跃迁的 Einstein 系数^[18]公式为

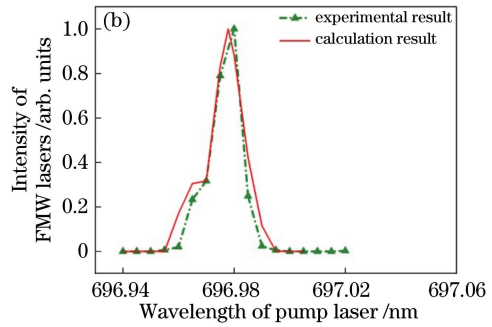
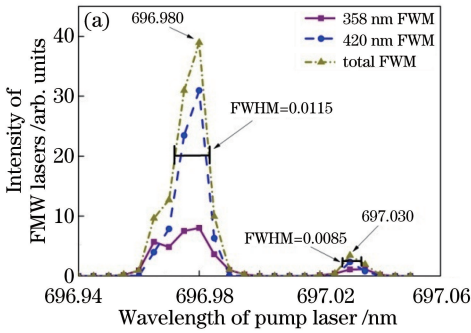


图 3 四波混频激光信号强度随泵浦光波长变化情况。(a)实验结果;(b)实验结果与理论计算对比图

Fig. 3 Variation curves of FWM laser intensity with pump laser wavelength. (a) Experimental results; (b) comparison between experimental and calculation results

$$A_{6D \rightarrow 7P} = \frac{8\pi^3 N_{6D} \omega_{6D \rightarrow 7P}^3}{3000hc} [\langle 6D | \mathbf{r} | 7P \rangle]^2, \quad (1)$$

$$A_{6D \rightarrow 6P} = \frac{8\pi^3 N_{6D} \omega_{6D \rightarrow 6P}^3}{3000hc} [\langle 6D | \mathbf{r} | 6P \rangle]^2, \quad (2)$$

式中: A 为 Einstein 系数; N_{6D} 为 $6D_{5/2}$ 能级的粒子数布居; $6D \rightarrow 7P$ 和 $6D \rightarrow 6P$ 分别为 $6^2D_{5/2} \rightarrow 7^2P_{3/2}$ 和 $6^2D_{5/2} \rightarrow 6^2P_{3/2}$ 以角频率形式表示的对应跃迁的能级差; $[\langle 6D | \mathbf{r} | 7P \rangle]^1$ 和 $[\langle 6D | \mathbf{r} | 6P \rangle]^1$ 为 $6^2D_{5/2} \rightarrow 7^2P_{3/2}$ 和 $6^2D_{5/2} \rightarrow 6^2P_{3/2}$ 的跃迁距。(1)式和(2)式的比值即为对应的 Einstein 系数之比:

$$\frac{A_{6D \rightarrow 7P}}{A_{6D \rightarrow 6P}} = \frac{\omega_{6D \rightarrow 7P}^3 [\langle 6D | \mathbf{r} | 7P \rangle]^2}{\omega_{6D \rightarrow 6P}^3 [\langle 6D | \mathbf{r} | 6P \rangle]^2} = \frac{1}{263.5} \frac{[\langle 6D | \mathbf{r} | 7P \rangle]^2}{[\langle 6D | \mathbf{r} | 6P \rangle]^2}. \quad (3)$$

根据文献[18-19]提供的算法, $6^2D_{5/2} \rightarrow 7^2P_{3/2}$ 和 $6^2D_{5/2} \rightarrow 6^2P_{3/2}$ 跃迁距的大小在同一数量级。因

此 $6^2D_{5/2} \rightarrow 6^2P_{3/2}$ 跃迁 ASE 明显强于 $6^2D_{5/2} \rightarrow 7^2P_{3/2}$,所以 420 nm 四波混频激光明显强于 358 nm 激光。

在 696.950~696.970、696.985~697.000、697.015~697.025、697.035~697.040 nm 之间,358 nm 四波混频激光信号强度要强于 420 nm。也就是说,在稍偏离最佳共振位置 ± 0.02 nm 的泵浦光波长范围内,358 nm 四波混频激光信号强度要强于 420 nm;当接近最佳共振位置时,420 nm 四波混频激光信号强度显著提升。值得注意的是,当泵浦光波长位于 696.970 nm 处时,处于上升阶段的 358 nm 激光信号强度突然下降,然后又开始上升。原因是 420 nm 和 358 nm 四波混频激光共用 $6^2D_{5/2}$ 能级而导致谱线竞争,当接近最佳共振位置时,420 nm 信号在竞争中占据优势,导致 358 nm 信号强度相对减弱。

将相同泵浦光波长下得到的 420 nm 和 358 nm 四波混频激光信号强度相加,得到图 3(a)中总四波混频激光信号强度随泵浦光波长变化情况。从图中可以看到,经由 $6^2D_{5/2}$ 态实现四波混频的激发激光光谱半峰全宽为 0.0115 nm (7.41 GHz),经由 $6^2D_{3/2}$ 态实现四波混频的激发激光光谱半峰全宽为 0.0085 nm (4.92 GHz)。同时,激发光在 696.980 nm 附近产生的四波混频激光信号强度要显著高于 697.030 nm 附近,也就是说,经由 $6^2D_{5/2}$ 态产生四波混频激光的效率要高于 $6^2D_{3/2}$ 态。

Rb 包含两种同位素 ^{85}Rb 和 ^{87}Rb ,两者比例分别为 72.2% 和 27.8%;同位素光谱线的质量移位公式^[20]为

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{m\delta M}{M(M + \delta M)}, \quad (4)$$

式中: ν 和 $\delta\nu$ 分别为光谱频率和频率差; M 和 δM 分别为原子核质量和质量差; m 为电子质量^[20]。

经过计算,在 160 °C 时, ^{85}Rb 和 ^{87}Rb 的多普勒加宽分别为 696.5 MHz 和 687.2 MHz,碰撞加宽为 0.14 MHz, $6^2D_{5/2}$ 态的自然加宽线宽为

0.345 MHz。由于碰撞加宽远远小于多普勒加宽,所以光谱加宽整体表现为非均匀加宽,可近似为高斯线型。尚未发现文献报道铷同位素 6D 能级的精细谱图,因此,此处借用铷同位素 5D 精细能级分裂数值^[21],首先计算每条考虑多普勒加宽条件下的精细谱线,并将其加成,再与泵浦激光的谱线进行卷积处理,获得如图 3(b)所示的计算结果。理论计算激发谱宽度略大于实验结果,可能是由于原子核对 6D 电子造成的精细能级分裂略小于 5D,因此计算值偏大。综上所述,图 3(a)中激发谱线的加宽是由于铷同位素位移、多普勒加宽和泵浦激光线宽共同造成的。

3.2 四波混频激光信号强度随泵浦光单脉冲能量变化

在 696.980 nm ($5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2D_{5/2}$) 和 697.030 nm ($5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2D_{3/2}$) 的最佳泵浦光波长处,测量并记录产生的 358.7 nm、359.1 nm 和 420.3 nm 三种四波混频激光信号强度随泵浦激光单脉冲能量变化情况,如图 4 所示。其中,实验条件:以 $f = 300$ mm 透镜聚焦于样品池中心,染料激光的脉冲宽度为 10 ns,发散角为 2 mrad。

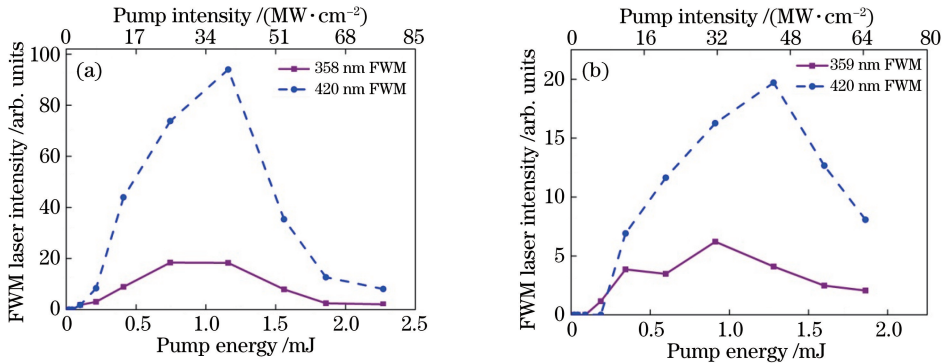


图 4 FWM 信号强度随泵浦光单脉冲能量变化情况。(a)以 $6^2D_{5/2}$ 能级为中间态;(b)以 $6^2D_{3/2}$ 能级为中间态

Fig. 4 Variation of FWM intensity with single pulse energy of pump laser. (a) $6^2D_{5/2}$ state as intermediate state; (b) $6^2D_{3/2}$ state as intermediate state

从图 4(a)和(b)可以看出,当泵浦激光能量达到某一值后,产生的 358.7 nm、359.1 nm 和 420.3 nm 四波混频激光信号强度开始下降。为了分析这一现象的成因,本文测量了可能获得的 780.2 nm 和 794.9 nm 四波混频激光信号,但并未获得任何结果;也就是说,经由 $6^2D_{5/2}$ 和 $6^2D_{3/2}$ 态不会产生 780.2 nm 和 794.9 nm 两种四波混频激光信号。在此基础上,在泵浦光单脉冲能量为 0.6~1.8 mJ 范围内,测量了 358.7 nm、359.1 nm、420.3 nm、421.7 nm、780.2 nm、794.9 nm 六种荧光信号强度,并与相同泵浦光波长下得到的总四波

混频激光信号强度进行比较,结果如图 5 所示。其中,实验条件与图 4 相同。

从图 5(a)和(b)可以看出,当泵浦光单脉冲能量大于 1 mJ 后,虽然总四波混频激光信号强度开始下降,但荧光强度依然处于上升状态,这很可能是泵浦光单脉冲能量大于 1 mJ 后,吸收饱和以及铷原子多光子共振增强下的电离过程共同导致的。如图 6 所示,在 1 mJ 泵浦能量条件下,四波混频的强度随着温度的升高而增加,也侧面证实了吸收饱和(近饱和)现象的存在。饱和激发又会显著改变小信号下的色散曲线和折射率系数,从而降低了四波混频效

率。当然也可能是泵浦光单脉冲能量大于 1 mJ 后, 电离几率显著提升并形成了等离子体, 改变了折射率, 破坏了原有的相位匹配条件, 因而使产生的四波

混频激光信号强度下降; 但是折射率的变化不会改变荧光信号强度, 所以随着泵浦光单脉冲能量的增加, 产生的荧光信号强度继续上升。

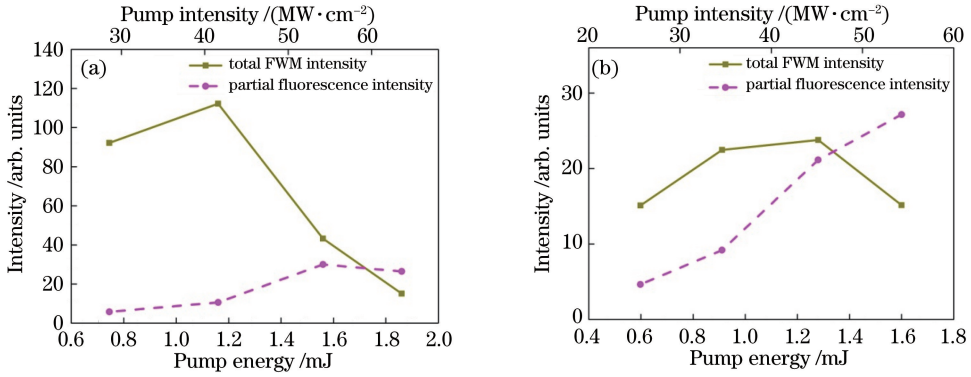


图 5 部分荧光信号强度与总 FWM 强度比较。(a)以 6²D_{5/2} 能级为中间态; (b)以 6²D_{3/2} 能级为中间态
Fig. 5 Comparison of partial fluorescence signal intensity and FWM intensity. (a) 6²D_{5/2} state as intermediate state; (b) 6²D_{3/2} state as intermediate state

3.3 四波混频激光信号强度随体系温度变化

在 696.980 nm 和 697.030 nm 的泵浦光波长处, 当泵浦光单脉冲能量为 1 mJ 时, 测量了产生的

四波混频激光信号强度随体系温度的变化情况, 如图 6 所示。

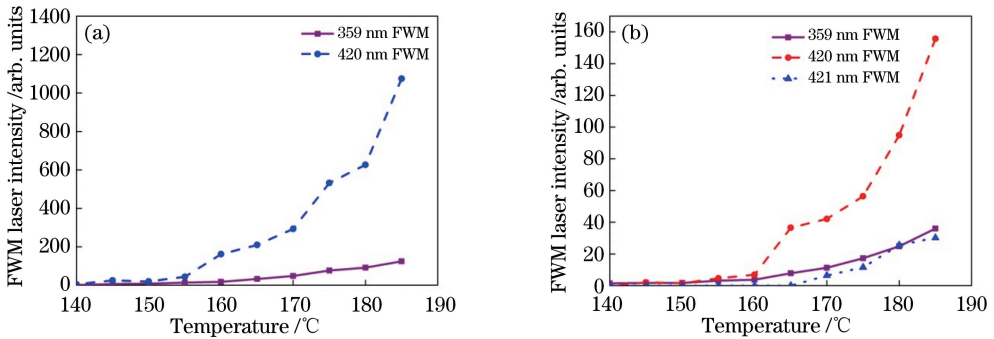


图 6 FWM 强度随体系温度的变化情况。(a)以 6²D_{5/2} 能级为中间态; (b)以 6²D_{3/2} 能级为中间态
Fig. 6 FWM intensity change with system temperature. (a) 6²D_{5/2} state as intermediate state; (b) 6²D_{3/2} state as intermediate state

从图 6(a)和(b)可以看出, 产生的 358.7 nm、359.1 nm、420.3 nm 和 421.7 nm 四波混频激光信号强度随体系温度升高而增强。经过计算, 1 mJ 泵浦光中含有 3.5×10^{15} 个光子, 而在蒸气室内部, 160 °C 时气体铷原子的总量为 3×10^9 ; 光子数是铷原子数的 10^6 倍, 且只有部分光子被铷原子吸收, 因此泵浦光的利用率会随着体系温度的增加而增加, 因而产生的四波混频激光信号强度也会随之增强。

6²P_{1/2} → 5²S_{1/2} 的跃迁; 这一跃迁的存在表明 6²P_{1/2} 能级上有粒子数积累, 并且存在 6²D_{5/2} → 6²P_{1/2} 的跃迁。根据电偶极辐射跃迁的选择定则, 6²D_{5/2} → 6²P_{1/2} 是偶极禁戒跃迁的, 这一反常跃迁可能是由于双光子共振增强下的超拉曼散射(HRS)导致的。HRS 是一种高阶非线性效应, 通常较弱, 但是由于 6²D_{5/2} 态的双光子共振增强下, HRS 几率显著提升, 产生了 5²S_{1/2} → 6²D_{5/2} → 6²P_{1/2} 跃迁通道。双光子共振增强下的超拉曼散射也可能是图 3 中谱线展宽的原因。

在 6²D_{5/2} 能级实验中, 发现当温度高于 185 °C 时, 出现了 420 nm 和 421 nm 的“双线”情况, 如图 7 所示。

在 6²D_{3/2} 的实验中, 发现当体系温度低于 165 °C 时, 只存在 359.1 nm 和 420.3 nm 两种四波混频激光信号强度; 当温度高于 165 °C 时, 出现

经过积分求解, 421 nm 信号的相对强度仅为 420 nm 强度的 1/50。已知 421 nm 信号对应着

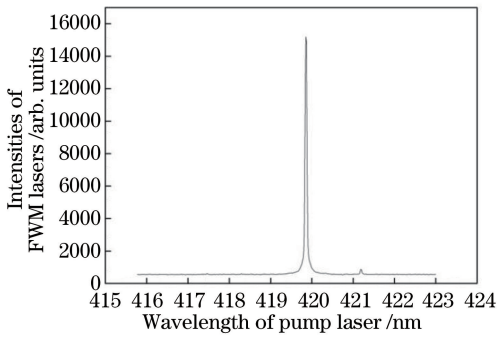


图 7 185 °C 时以 $6^2D_{5/2}$ 能级为中间态的四波混频出现的 420 nm 和 421 nm 双线光谱图

Fig. 7 Double line spectrum of 420 nm and 421 nm at 185 °C obtained by the resonant excitation to $6^2D_{5/2}$ state

421.7 nm 四波混频激光信号,但是即使温度高于 180 °C 时,仍未出现 358 nm 四波混频激光信号;因此,产生 358 nm 和 421 nm 激光信号的临界温度值要高于产生 359 nm 和 420 nm 的温度。也就是说,对于 $6^2D_{3/2}$ 能级作为中间态的双光子激发和四波混频过程,359 nm 比 358 nm 更易发生,420 nm 比 421 nm 更易发生。

计算了 175 °C、180 °C、185 °C 下产生的 420 nm 和 421 nm 四波混频激光信号强度比值,结果如图 8 所示。

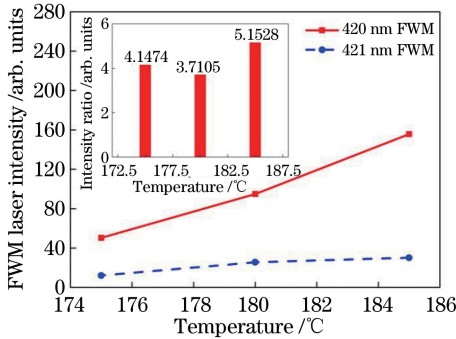


图 8 不同温度下以 $6^2D_{3/2}$ 能级为中间态产生的 420 nm 和 421 nm FWM 信号强度比

Fig. 8 Signal intensity ratio of 420 nm and 421 nm FWM excited to $6^2D_{3/2}$ at different temperatures

从图 8 可以看出,最小值出现在 180 °C 处,据此推测,当温度高于 185 °C 时,420 nm 四波混频激光信号强度会显著高于 421 nm 信号强度。

4 结 论

本文利用铷原子中 $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2D_{5/2}$ 和 $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2D_{3/2}$ 的双光子激发及四波混频原理,产生了 358.7 nm 和 359.1 nm 两种四波混频紫外激光以

及 420.3 nm 和 421.7 nm 两种四波混频蓝光激光,得出了经过 $6^2D_{5/2}$ 和 $6^2D_{3/2}$ 两个中间态分别产生的总四波混频激光信号强度及共振线宽。同时,通过改变泵浦光能量及体系温度,优化了输出的四波混频激光信号强度;发现了 $6^2D_{5/2} \rightarrow 6^2P_{1/2}$ 的偶极禁戒跃迁,双光子共振增强下的超拉曼散射可能是该禁戒跃迁的成因。如果使用窄线宽泵浦源共振激发铷原子 $5^2S_{1/2} \rightarrow 6^2D_{5/2} \rightarrow 6^2P_{1/2}$ 过程,则蓝光和紫外激光强度有望显著提升。此外,窄线宽的二极管激光器也可以用来作为泵浦源,因此,该四波混频蓝光和紫外激光有望具有良好的功率放大性。这种在铷原子蒸气中利用双光子激发及四波混频原理产生的蓝光和紫外激光能够为水下激光通信、激光显示技术、荧光激发、拉曼光谱学、海洋资源探测、激光生物医疗、光刻技术及高密度信息存储等领域提供一种新的激光光源。

参 考 文 献

- [1] Yang Z X, Liang Y J, Zhang J, et al. Study of submarine laser communication [J]. Ome Information, 2006, 23(2): 48-51.
杨正兴, 梁玉军, 张静, 等. 蓝绿激光对潜通信研究 [J]. 光电信息, 2006, 23(2): 48-51.
- [2] Shen N, Guo J, Zhang X J. Influence of bit-error rate in laser underwater communications [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 2935-2939.
沈娜, 郭婧, 张祥金. 激光水下通讯误码率的影响 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2935-2939.
- [3] Zheng Q, Yao Y, Li B, et al. 13.2 W laser-diode-pumped Nd:YVO₄/LBO blue laser at 457 nm [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(6): 1238-1242.
- [4] Li C L, Sun G C, Yu X, et al. Intracavity sum-frequency generation of CW blue light in Nd:LuVO₄ laser [J]. Laser Physics, 2011, 21(6): 1051-1053.
- [5] Xu B, Camy P, Doualan J L, et al. Frequency doubling and sum-frequency mixing operation at 469.2, 471, and 473 nm in Nd:YAG [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2012, 29(3): 346-350.
- [6] Deyra L, Martial I, Didierjean J, et al. 3 W, 300 μJ, 25 ns pulsed 473 nm blue laser based on actively Q-switched Nd:YAG single-crystal fiber oscillator at 946 nm [J]. Optics Letters, 2013, 38(16): 3013-3016.
- [7] Salminen A, Jansson A, Kujanpaa V. Effect of welding parameters on high-power diode laser welding of thin sheet [J]. Proceedings of SPIE, 2003,

- 4973: 106-115.
- [8] Erbert G, Bugge F, Knigge A, et al. Highly reliable 75 W InGaAs/AlGaAs laser bars with over 70% conversion efficiency[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6133: 61330B.
- [9] Havrilla D, Brockmann R, Strohmaier S, et al. Dramatic advances in direct diode lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7583: 75830B.
- [10] Zhang Y, Zhang F, Bian Y. Application of laser communication in submarine communication [J]. Optical Communication Technology, 2006, 30(7): 43-45.
张杨, 张芳, 卞勇. 激光通信及其在潜艇通信中的应用[J]. 光通信技术, 2006, 30(7): 43-45.
- [11] Wang Y J, Li Z Y, Tan R Q, et al. Etalon effect of vapor cell windows in alkali lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0801003.
王玉洁, 李志永, 谭荣清, 等. 碱金属激光器蒸气室窗口片的标准具效应研究[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0801003.
- [12] Ren G G, Yi W W, Qi Y, et al. U.S. theater and strategic UVA-borne laser weapon [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100002.
任国光, 伊炜伟, 齐予, 等. 美国战区 and 战略无人机载激光武器 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 100002.
- [13] Han G C, Li Z Y, Tan R Q, et al. Output properties of self-heated alkali laser with mini vapor cell [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0601002.
韩高策, 李志永, 谭荣清, 等. 短蒸气室自加热碱金属激光器输出特性 [J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0601002.
- [14] Cao R, Gai B, Yang J, et al. Efficient generation of collimated frequency upconversion blue light in rubidium vapor [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(12): 121903.
- [15] Gai B D, Hu S, Liu J B, et al. The response speed and fatigue characteristics of a pulsed 778 nm \rightarrow 420 nm conversion in rubidium vapor [J]. Optics Communications, 2016, 374: 142-147.
- [16] Gai B D, Cao R, Xia X S, et al. Modulation of a double-line frequency up-conversion process in cesium vapor [J]. Applied Physics B, 2016, 122(6): 1-7.
- [17] Gai B D, Hu S, Li X Y, et al. Influence of pumping power density on output intensities and stabilities of competitive multi-line frequency up-conversions in cesium vapor [J]. Optics & Laser Technology, 2017, 95: 18-22.
- [18] Zhang Y W. Molecular spectroscopy [M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 1987: 98-102.
张允武. 分子光谱学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1987: 98-102.
- [19] Šibalić N, Pritchard J D, Adams C S, et al. ARC: an open-source library for calculating properties of alkali Rydberg atoms [J]. Computer Physics Communications, 2017, 220: 319-331.
- [20] Yang F J. Atomic physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 375-377.
杨福家. 原子物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 375-377.
- [21] Fan P R, Li Y H, Li S H, et al. Experimental investigation on the 420 nm blue light generated by two-photon transition of Rb [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2017, 23(2): 144-150.
范鹏瑞, 李一鸿, 李少华, 等. 利用铷原子双光子跃迁产生 420 nm 蓝光的实验研究 [J]. 量子光学学报, 2017, 23(2): 144-150.