

双光子吸收 420 nm 碱金属蒸气蓝光激光器

谭彦楠 李义民 公发全 刘通 刘万发

(中国科学院大连化学物理研究所中国科学院化学激光重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要 利用双光子吸收机制,以 778 nm 染料激光器作为抽运源,以碱金属 Rb 蒸气作为增益介质,成功获得了 420 nm 的蓝光激光输出。以 Rb 原子能级结构为基础,对其产生蓝光的机理和双光子吸收机制进行了分析描述。基态 $5^2S_{1/2}$ 能级的 Rb 原子通过吸收两个 778.1 nm 的光子跃迁到激发态 $5^2D_{5/2}$ 能级,通过辐射中红外光子跃迁到激光上能级 $6^2P_{3/2}$,与基态 $5^2S_{1/2}$ 能级形成粒子布居数反转,产生 420 nm 蓝色激光。对激光二极管抽运碱金属蓝光激光器的发展前景进行了展望。

关键词 激光器; 碱金属蒸气激光器; 蓝光激光器; 双光子吸收

中图分类号 TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1002011

420 nm Alkali Blue Laser Based on Two-Photon Absorption

Tan Yannan Li Yimin Gong Faquan Liu Tong Liu Wanfa

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

Abstract Based on two-photon absorption and pumped by a 778.1 nm dye laser, a 420 nm blue laser is achieved by using alkali Rb vapor as gain medium. Utilizing the energy level structure of Rb atom, blue laser mechanism and two-photon absorption process are analysed. By absorbing two 778.1 nm photons, Rb atoms are transitted from ground state $5^2S_{1/2}$ to excited state $5^2D_{5/2}$, then to laser up state $6^2P_{3/2}$ and ground state $5^2S_{1/2}$ populating inversion is formed through radiating mid-infrared photon. The 420 nm blue laser is achieved through $6^2P_{3/2}$ to $5^2S_{1/2}$. The development prospect of laser diode pumped alkali vapor blue laser is expected.

Key words lasers; alkali vapor laser; blue laser; two-photon absorption

OCIS codes 140.1340; 140.3460; 140.3613

1 引言

2003 年, Krupke 等^[1]首次提出采用激光二极管(LD)抽运碱金属蒸气激光器(DPAL)的概念,并于 2005 年,首次报道了采用 LD 抽运获得了铷蒸气激光器的出光^[2]。DPAL 以其体积小、量子效率高、易于流动散热、光束质量好、波长大气传输效率高、附属设备简单以及太阳能电板吸收波长共振等优点,成为未来高能激光的一个重要发展方向,受到国内外的广泛关注^[3-4]。国际上,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室、美国空军武器实验室、空军学院、空军技术学院、通用原子公司、俄罗斯联邦原子能中心以及日本的滨松光子公司等开展了 DPAL 的广泛研究^[5-10]。国内方面,国防科技大学和浙江大学也开展

了 DPAL 的深入研究^[11-12]。2012 年, Bogachev 等^[9]报道了采用二极管阵列(LDA)抽运的铯蒸气激光器出光功率已达约 1 kW,斜率效率约为 48%,是目前已报道出光功率最高的 DPAL 激光器。

蓝光激光器在水下通信、海洋资源探测、高密度光存储、激光制冷、激光生物医学等方面有着广泛的应用^[13]。国外已经采用多种方法利用碱金属蒸气作为工作物质获得了蓝光输出,国内还尚无这方面研究工作的报道。Schultz 等^[14]采用两台波长分别为 852 nm 和 917 nm 的激光二极管抽运 Cs 蒸气激光器,成功获得了约 4 μ W 的蓝光输出。Meijer 等^[15]利用两台波长分别为 780 nm 和 776 nm 的激光二极管抽运 Rb 蒸气激光器,成功获得了 40 μ W

收稿日期: 2013-05-07; 收到修改稿日期: 2013-05-21

作者简介: 谭彦楠(1984—),男,博士,助理研究员,主要从事激光器方面的研究。E-mail: yannan_tan@163.com

的蓝光输出,最高转换效率为 0.1%。但是两个波长抽运源的使用使得整个系统非常复杂。Akulshind 等^[16]利用四波混频机制,Sulham 等^[17]利用双光子吸收机制,也分别获得了蓝光输出。

采用一种波长为 778 nm 的染料激光器作为抽运源,利用碱金属 Rb 蒸气作为增益介质,成功获得了 420 nm 的蓝光输出。以 Rb 原子能级结构为基础,对其产生蓝光的机理和双光子吸收机制进行了分析描述。为水下通信、海洋资源探测、高密度光存储等提供了一定的参考。

2 理论分析

碱金属铷原子的能级图如图 1 所示。DPAL 的原理为,在 780.2 nm 半导体激光器的抽运下,铷原子由基态 $5^2S_{1/2}$ 能级向激发态 $5^2P_{3/2}$ 能级跃迁。由于 $5^2P_{3/2}$ 能级到 $5^2P_{1/2}$ 能级为禁忌跃迁,在被激发的

铷原子发生自发辐射或以其他能量形式淬灭回到基态之前,需要通过甲烷、乙烷或氦气等分子的碰撞,使 $5^2P_{3/2}$ 能级态的铷原子快速弛豫到激光上能级 $5^2P_{1/2}$ 与基态 $5^2S_{1/2}$ 能级形成粒子束反转。以受激辐射的方式由 $5^2P_{1/2}$ 能级回到基态 $5^2S_{1/2}$ 能级时,产生波长为 795 nm 的激光辐射。铷原子以与此类似的原理也可以产生蓝光激光。利用 420 nm 的抽运光,将铷原子由基态 $5^2S_{1/2}$ 能级激发到 $6^2P_{3/2}$ 能级,同样利用甲烷、乙烷或氦气等分子的碰撞,使得 $6^2P_{3/2}$ 态的铷原子快速弛豫到激光上能级 $6^2P_{1/2}$,与基态 $5^2S_{1/2}$ 能级形成粒子数反转。铷原子以受激辐射的方式由 $6^2P_{1/2}$ 能级跃迁回基态 $5^2S_{1/2}$ 能级时,产生波长为 421 nm 的蓝光激光辐射。这种方法的缺点为,由于 $6^2P_{3/2}$ 与 $6^2P_{1/2}$ 能级间隔非常接近,由波尔兹曼分布可知,将导致两个能级之间存在一定的热分布,不利于激光辐射的最终实现。

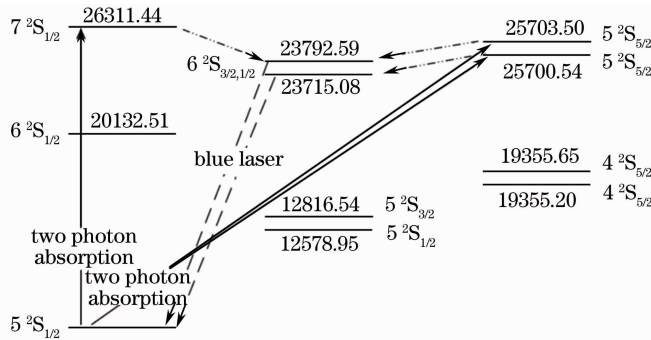


图 1 Rb 原子能级结构及激光机理示意图

Fig. 1 Energy level diagram and laser mechanism for Rb atom

铷原子通过双光子吸收实现蓝光输出的过程可以分为以下几种类型:1) 铷原子由基态 $5^2S_{1/2}$ 能级通过吸收两个 760.1 nm 的光子激发到 $7^2S_{1/2}$ 能级,辐射出 3970 nm 和 3852 nm 的光子后,跃迁到激光上能级 $6^2P_{3/2}$ 或 $6^2P_{1/2}$ 能级,与基态 $5^2S_{1/2}$ 能级构成粒子数反转,产生 420.3 nm 或 421.7 nm 的蓝光激光;2) 铷原子由基态 $5^2S_{1/2}$ 能级通过吸收两个 778.1 nm 光子跃迁到激发态 $5^2D_{3/2}$ 能级,辐射出 5233 nm 的光子后跃迁到激光上能级 $6^2P_{3/2}$,与基态 $5^2S_{1/2}$ 能级产生粒子数反转,产生 420.3 nm 的蓝光激光;3) 铷原子通过吸收两个 778.2 nm 的光子由基态 $5^2S_{1/2}$ 能级跃迁到 $5^2D_{1/2}$ 能级,辐射出 5241 nm 和 5037 nm 的光子后,跃迁到激光上能级 $6^2P_{3/2}$ 或 $6^2P_{1/2}$ 能级,与基态 $5^2S_{1/2}$ 能级产生粒子数反转,产生 420.3 nm 和 421.7 nm 的蓝光激光。

3 实验结果及分析

双光子吸收碱金属 Rb 蒸气蓝光激光器实验装置如图 2 所示。抽运源为 Nd:YAG 固体激光器抽运的 Lambda Physik 型染料激光器。脉冲抽运光脉宽为 8 ns,重复频率为 10 Hz,单脉冲能量最高可达 20 mJ,线宽为 2 GHz,光斑直径为 4 mm,发散角约

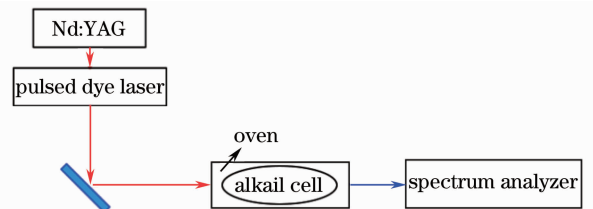


图 2 双光子吸收碱金属 Rb 蒸气蓝光激光器实验装置示意图

Fig. 2 Experimental diagram of alkali Rb vapor blue laser based on two-photon absorption

为 1 mrad。利用光谱仪测量抽运光谱图,如图 3 所示,波长为 780.1 nm。使用的碱金属增益池长为 10 cm,直径为 3 cm,其内填充的为碱金属 Rb,整个增益池置于加热装置中,并有温度反馈装置进行温控,实验中,增益池被加热到最高 220 °C。利用光谱仪监测蓝光激光出光情况。

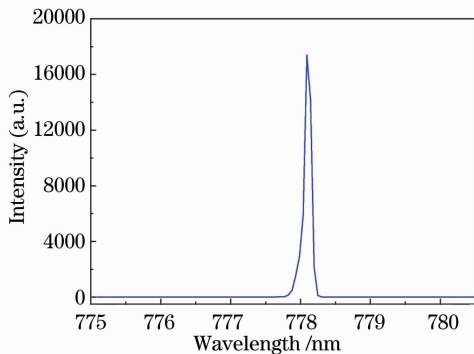


图 3 抽运染料激光器光谱图

Fig. 3 Spectrum diagram of dye laser as pump source

对增益池进行加热,当温度低于 140 °C 时,无激光产生。当温度为 140 °C 时,开始有微弱的 420.3 nm 蓝光激光出现,其强度随温度的升高而增加,当温度达到 200 °C 以上时,开始有 421.7 nm 蓝光出现,但光强较弱。图 4 为 220 °C 时蓝光激光光谱图。图 5 为用承接屏观察到的实际蓝光光斑图。由图 5 可知,产生的蓝光具有明确的方向性、明确的激光光斑和清晰的光斑轮廓,且由光谱仪检测具有单一的频率,可以确定是激光而并非放大的自发辐射。Rb 蒸气浓度与温度成正比,当温度低于 140 °C,工作物质数量不够,导致增益不够没有出光。当温度高于 140 °C 时,随着 Rb 蒸气浓度的增加,整个系统增益大于损耗,开始有 420.3 nm 蓝光输出。随着温度的升高,Rb 蒸气浓度不断增加,系统增益也不断增加,所以蓝光光强持续增强。421.7 nm 处蓝光出现的原因是,当温度高于 200 °C 时,铷原子浓度较高,激发

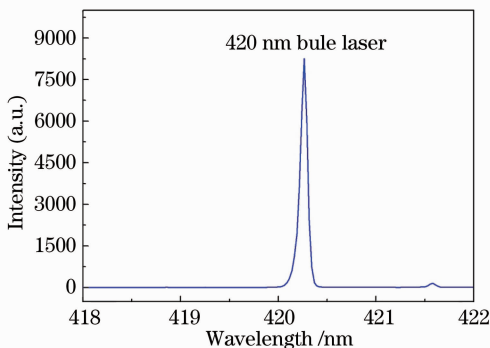


图 4 420 nm 蓝光激光光谱图

Fig. 4 Spectrum diagram of 420 nm blue laser

态 $6^2P_{3/2}$ 能级上 Rb 原子相互碰撞使得部分 Rb 原子由 $6^2P_{3/2}$ 能级弛豫到 $6^2P_{1/2}$ 能级与基态 $5^2S_{1/2}$ 能级形成粒子数反转,产生 421.7 nm 的蓝光。但由于碰撞截面较小,421.7 nm 蓝光强度较弱。

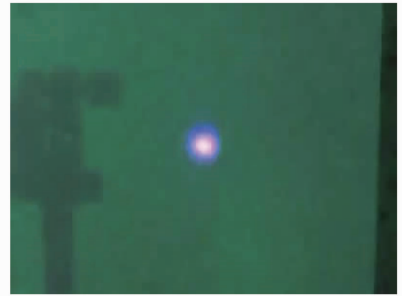


图 5 420 nm 蓝光光斑图

Fig. 5 Facula diagram of 420nm blue laser

4 结 论

利用染料激光器作为抽运源,碱金属 Rb 蒸气作为增益介质,成功获得了 420 nm 的蓝光输出,并对其产生蓝光的机理和双光子吸收机制进行了分析。目前半导体激光抽运源制作工艺日趋成熟,如果结合半导体激光抽运源的优势,研制双光子吸收二极管抽运碱金属蓝光激光器,将具有更加广阔的发展前景和应用价值。这种碱金属蒸气蓝光激光器与已报道的 DPAL 相比,由于增益池中不用填充氦气和乙烷,不仅结构简单,还能避免尚未研究清楚的窗口污染问题,且不用在高压环境下工作,降低了增益池设计的难度。但其也面临了一些问题,由于双光子吸收属非线性效应,碱金属蒸气蓝光激光器的阈值在 10 kW/cm^2 以上,因此对抽运源及耦合聚焦光路系统提出了更高的要求。

参 考 文 献

- 1 W F Krupke, R J Beach, V K Kanz, *et al.*. High-power laser diode-pumped alkali metal vapor laser[J]. *Opt Lett*, 2003, 28 (23): 2336-2338.
- 2 R H Page, R J Beach, V K Kanz, *et al.*. First demonstration of a diode-pumped gas (alkali vapor) laser [C]. *CLEO*, 2005, 467-469.
- 3 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.*. Research development of laser diode pumped alkali lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(5): 051405. 杨子宁,王红岩,陆启生,等. 半导体抽运碱金属蒸气激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(5): 051405.
- 4 B V Zhdanov, R J Knize. Diode pumped alkali lasers[C]. *SPIE*, 2011, 8187: 818707.
- 5 D A Hostutler, W L Klennert. Power enhancement of a rubidium vapor laser with a master oscillator power amplifier[J]. *Opt Express*, 2008, 16(11): 8050-8053.
- 6 B V Zhdanov, J Sell, R J Knize. Multiple laser diode array pumped Cs laser with 48 W output power[J]. *Electron Lett*,

- 2008, 44(9): 582–584.
- 7 G Hager, J McIver, D Hostutler, *et al.*. Quasi-two level analytic model for end pumped alkali metal vapor laser[C]. SPIE, 2008, 7005: 700528.
- 8 G A Pitz, G P Perram. Pressure broadening of the D1 and D2 lines in diode pumped alkali lasers [C]. SPIE, 2008, 7005: 700526.
- 9 A V Bogachev, S G Garanin, A M Dudov, *et al.*. Diode-pumped caesium vapour laser with closed-cycle laser-active medium circulation[J]. Quantum Electron, 2012, 42(2): 95–98.
- 10 Y Wang, M Niigaki, H Fukuoka, *et al.*. High-efficiency 894 nm laser emission of laser-diode-bar-pumped cesium-vapor laser[J]. Appl Phys Exp, 2009, 2(3): 032051.
- 11 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.*. Influence of fine structure mixing rate on laser diode pumped alkali laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2502–2507.
杨子宁, 王红岩, 陆启生, 等. 精细结构混合速率对激光二极管抽运碱金属蒸气激光器性能的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2502–2506.
- 12 Y J Wang, B L Pan, Q Zhu, *et al.*. A kinetic model for diode pumped rubidium vapor laser[J]. Opt Commun, 2011, 284(16-17): 40–45.
- 13 W Risk, T Gosnell, A Nurmikko. Compact Blue-Green Lasers [M]. Cambridge University Press, 2003. 1–17.
- 14 J Schultz, S Abend, D Döring, *et al.*. Coherent 455 nm beam production in a cesium vapor[J]. Opt Lett, 2009, 34(15): 2321–2323.
- 15 T Meijer, J White, B Smeets, *et al.*. Blue five-level frequency-upconversion system in rubidium[J]. Opt Lett, 2006, 31(7): 1002–1004.
- 16 A Akulshin, R McLean, A Sidorov, *et al.*. Coherent and collimated blue light generated by four-wave mixing in Rb vapour [J]. Opt Express, 2009, 17(25): 22861–22870.
- 17 C V Sulham, G A Pitz, G P Perram. Blue and infrared stimulated emission from alkali vapors pumped through two-photon absorption[J]. Appl Phys B, 2010, 101(1-2): 57–63.

栏目编辑:张 腾