文章编号 2095-1531(2019)01-0038-10

双光子吸收碱金属蒸气激光器研究进展

俞航航[1,2],陈 飞[1*],李耀彪[1*],何 洋[1],潘其坤[1],谢冀江[1],于德洋[1],卢启鹏[1]
(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室
光电对抗技术创新研究室,吉林 长春 130033;
2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 蓝紫激光和中红外激光在基础研究和国防工程中有重要的应用前景。单光子吸收的碱金属蒸气激光器具有量子效率高、受激发射截面大和热管理性能好等优点,近些年来已成为激光领域中研究热点之一,目前已实现 kW 量级的输出。双光子吸收的碱金属蒸气激光器可实现蓝紫激光和中红外激光级联输出的特性,也引起越来越多的关注。本文从碱金属原子密度、泵浦光功率、偏振和频率失调量以及调控激光等几种影响因素出发,综述了双光子吸收碱金属蒸气激光的研究进展,在此基础上分析了影响激光输出特性的原因,最后对双光子吸收碱金属蒸气激光器的发展趋势进行了展望。

关 键 词: 碱金属蒸气激光器; 双光子吸收; 红外激光; 蓝紫激光
中图分类号: TN248.2 **文献标识码:** A doi: 10.3788/CO.20191201.0038

Research progress on the two-photon absorption alkali vapor laser

YU Hang-hang[1,2], CHEN Fei[1*], LI Yao-biao[1*], HE Yang[1],
PAN Qi-kun[1], XIE Ji-jiang[1], YU De-yang[1], LU Qi-peng[1]
(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Innovation Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail*: 13021908922@163.*com*

Abstract: Blue-violet lasers and mid-infrared lasers play an important role in the fields of basic research and defense engineering. Single-photon absorption alkali vapor lasers have recently become an area of high interest in laser research for their key advantages, such as high quantum efficiency, large stimulated emission cross-sections and effective thermal management performance. At present, they have achieved an output power reaching 1 kW. Two-photon absorption alkali vapor lasers have attracted increasing attention for their blue-violet

收稿日期: 2017-10-26; **修订日期:** 2017-12-02
基金项目: 中科院国防创新基金项目(No. CXJJ-16M228); 吉林省中青年科技创新领军人才及团队项目(No. 20170519012JH); 吉林省重大科技招标专项(No.20160203016GX)
Supported by Defense Innovation Fund of Chinese Academy of Sciences(No.CXJJ-16M228); Young and Middle-Aged Science and Technology Innovation Leader and Team Project in Jilin Province(No.20170519012JH); Major Scientific and Technological Bidding in Jilin Province(No.20160203016GX)

laser and mid-infrared laser cascade output characteristics. In this paper, research progress on the two-photon absorption alkali vapor laser is reviewed with regards to alkali atomic density, pump laser power, polarization and frequency offset, controlling laser *etc*.. The reasons for any influence these factors have on output are then analyzed. Finally, predictions on the future development of the two-photon absorption alkali vapor laser are provided.

Key words: alkali vapor laser; two-photon absorption; infrared laser; blue-violet laser

1　引　言

半导体泵浦的碱金属蒸气激光器具有体积小、流动性好、量子效率高、热管理特性好等优点，近年来已经成为激光器领域研究热点之一，吸引众多科研人员的关注[1-8]。2001 年，美国的 Krupke 等人首次提出基于半导体激光泵浦的碱金属蒸气激光器的设计方案[9]，在 2005 年 T. Ehrenreich 课题组首次实现半导体激光泵浦铯蒸气激光输出[10]。经过几年的发展，2012 年，Bogachev 课题组采用双端侧面泵浦封闭循环流动式蒸气池，在泵浦光功率为 2 kW 时实现了最高功率为 1 kW 的铯蒸气激光输出[11]。2015 年，Hurd 课题组在脉冲泵浦条件下实现了输出光强为7 MW/cm^2 的无烃钾蒸气激光器[12]。与此同时，双光子吸收方式的碱金属蒸气激光器也备受研究人员的关注。采用双光子泵浦的方式更利于将碱金属原子激发到更高的能级，借助中间的能级实现可见的蓝光和中波红外激光级联同轴输出，避免在有双波段激光需求时双波长合束的困境。双波段激光输出不仅在科学研究中有应用需求，更为重要的是在光电对抗、激光制导等军事领域有广阔的应用前景[13-19]。此外，高功率蓝激光在原子物理、激光显示及激光水下通信与探测等领域也有重要的应用[20-24]。

目前，双光子吸收的碱金属蒸气激光器还处于起步研究阶段。本文对双光子吸收碱金属蒸气激光器的工作原理、发展现状进行了总结和分析，最后分析和展望了双光子吸收的碱金属蒸气激光器的未来发展趋势。

2　工作原理

双光子吸收的碱金属蒸气激光器的增益介质通常有钠(Na)、钾(K)、铷(Rb)和铯(Cs)，4 种碱金属原子具有相似的能级结构，也有相似的能级跃迁过程，以铷原子为例介绍其能级结构和能级跃迁过程。碱金属铷原子在泵浦光的作用下同时吸收两个光子从基态能级 5D 跃迁到 7D 或者 5D 高能级集聚，在极短时间内粒子数在高能级和 6P 能级之间形成粒子数反转，通过放大自发辐射的方式产生中红外光子。泵浦光和中红外光在满足相位匹配条件 $k_1+k_2=k_b+k_{IR}$，(其中 k_1、k_2 为泵浦光光矢量，其中 k_b、k_{IR} 分别为蓝光和中红外光的光矢量) 时，会产生相应波长的蓝光。从泵浦方式来说，双光子吸收碱金属蒸气激光器由单波长泵浦和双波长泵浦两种方式，以下从两种方式分别介绍。

2.1　单波长泵浦

单波长泵浦是用单一波长的泵浦光激励碱金属原子跃迁到相应的能级。图 1 是铷的能级结构图，基态铷原子同时吸收两个波长为 761 nm 的光子跃迁到 $7^2D_{1/2}$能级，或者同时吸收 778.1 nm 或 778.2 nm 的泵浦光跃迁到 5D 能级，粒子数在高能级(7S 或 5D) 和 6P 能级之间形成反转，原子会通过自发辐射的方式发射一个中红外光跃迁到 $6P_{3/2}$和 $6P_{1/2}$能级，碱金属蒸气中的四波混频效应使 6P 能级的粒子跃迁发出 422 nm 和 420 nm 的蓝光。碱金属原子能级有相似的结构，铯原子能级跃迁与铷原子有相似的过程。

2.2　双波长泵浦

双波长泵浦是用两个波长的激光激励碱金属原子跃迁到高能级。同样以铷原子为例，图 2 是铷原子在两个波长激光器泵浦条件下跃迁到 5D 能级和 7S 能级的示意图。铷原子吸收一个 780 nm光子跃迁到 5P 能级，然后再吸收一个 776 nm的光子从 5P 能级跃迁到 5D 能级或者吸收 741 nm 的泵浦光跃迁到 7S 能级，极短时间内

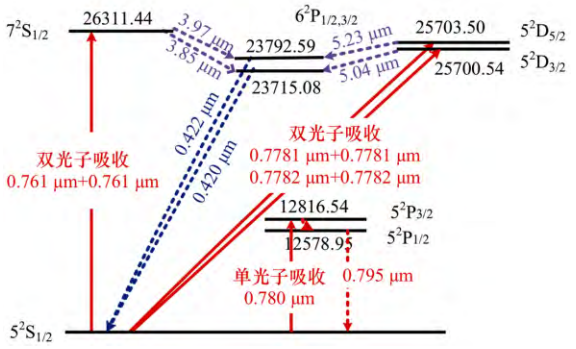


图 1 铷原子单波长泵浦能级跃迁图

Fig. 1 Energy level structure of single-wavelength pumped rubidium atom

在 5D 或 7S 能级和 6P 能级之间形成粒子数反转，辐射出一个中红外波长的光子跃迁回到 $6P_{1/2}$ 和 $6P_{3/2}$ 能级，最后通过四波混频效应辐射出一个蓝光的光子回到基态。

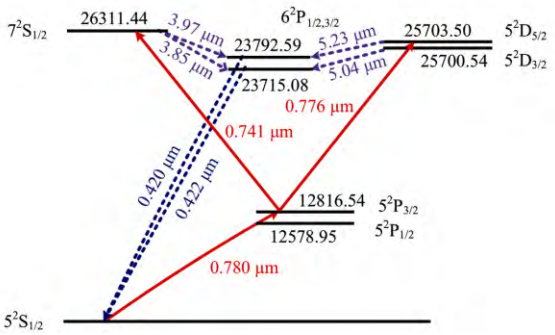


图 2 铷原子双波长泵浦能级跃迁图

Fig. 2 Energy level structure of double-wavelength pumped rubidium atom

3 双光子吸收的碱金属蒸气激光器研究进展

3.1 国外研究进展

双光子吸收碱金属蒸气激光器的研究始于上世纪 60 年代，但一直受限于缺少合适的泵浦源，碱金属蒸气作为增益介质的激光器研制工作进展缓慢。新世纪以来，伴随着窄线宽、高功率激光器的快速发展，研究人员的目光又重新聚焦到碱金属蒸气激光器的研究上。2002 年，美国的 A.S.Zibrov 课题组用相干光场的麦克斯韦方程组描述双光子吸收碱金属蒸气激光器的跃迁和吸收过程[25]。用非线性光学理论解释了泵浦光失调频率时蓝光光强变化的实验现象。当泵浦光频率接近于原子的拉比频率时，碱金属蒸气有最大的增益系数。

双光子吸收的碱金属蒸气激光器可以级联输出蓝光和中红外激光。目前受限于碱金属窗口材料，大部分文献以蓝紫激光研究为主。2006 年，澳大利亚 T. Meijer 课题组首次用双波长泵浦铷蒸气装置研究泵浦光频率失调量对蓝光特性的影响[26]。装置如图 3 所示，功率约 20 mW 的 780 nm和 776 nm 两束泵浦光通过分光棱镜入射到铷蒸气池 A 和参考蒸气池 B(70 ℃)中，蒸气池 B 用于确定 776 nm 光的频率失调量，输出蓝光的线宽和功率分别用法布里-珀罗腔和光电倍增管检测。实验发现蒸气池 A 温度为 200 ℃，780 nm 的光频率偏移为 2 GHz 时，蓝光最大功率为 40 μW，此时 776 nm 的光频率偏移为−2 GHz。由于蒸气池对泵浦光的吸收率很低，光-光效率只有 0.1%。

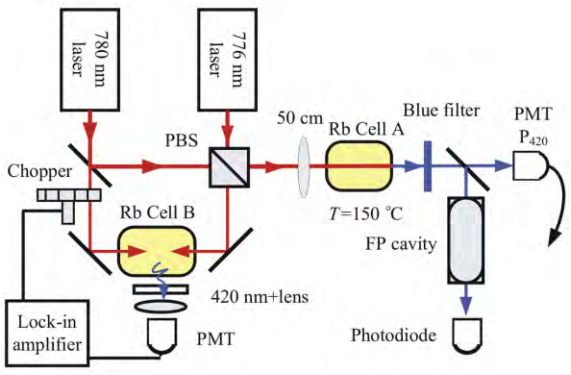


图 3 频率失调量对蓝光特性影响实验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the experimental device of frequency offset effect on the characteristics of blue light

澳大利亚斯威本科技大学的 Akulshin 等人对双波长泵浦铷蒸气激光器开展了广泛的研究。2009 年，该课题组用图 4 装置研究铷蒸气的出光特性[27]，双波长 780 nm 和 776 nm 的泵浦功率分别为 20 mW 和 15 mW，激光线宽为 1 MHz，蒸汽池长度为 5 cm。其中 780 nm 泵浦光频率由参考蒸气池监测(图中未标识出)，776 nm 泵浦光频率

由法布里-珀罗腔控制，两束光的偏振由一个 1/4 波片和 1/2 波片调节，产生的蓝光通过滤光片和分束片由光电倍增管(PMT) 测出功率和 CCD 检测光斑形状。实验主要研究了碱金属原子密度、泵浦光偏振等因素对蓝光输出功率的影响，测得了相干蓝光出现对应最小的原子密度约为 1.7×10^{11} cm^{-3}，而且随着碱金属原子密度增大，蓝光输出功率快速增大，但在原子密度大于 1×10^{12} cm^{-3} 时，蓝光功率出现了饱和。通过波片改变两束泵浦光的入射偏振态，分别以互相平行的线偏振(linear parallel) ，互相平行的圆偏振(circular parallel) 和互相正交的圆偏振(circular orthotropic) 3 种状态入射，得到泵浦光偏振态与蓝光功率之间的关系，如图 5 所示。互相平行的圆偏振光对应于最高的蓝光输出功率，功率最小的是正交的圆偏振光，互相正交圆偏振条件下产生的蓝光功率仅为平行圆偏振的 1/10，平行线偏振光所产生的蓝光功率也为正交圆偏振光状态下的 3 倍。

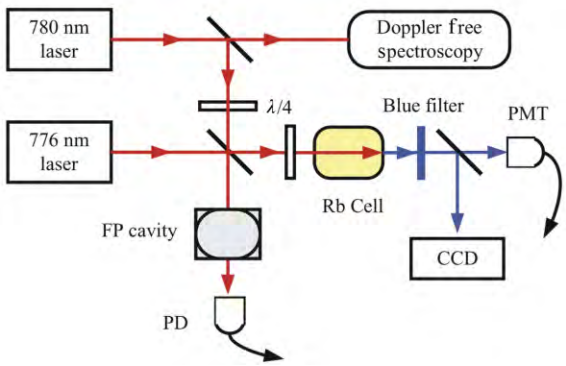


图 4　双波长激光泵浦铷蒸气实验装置图

Fig. 4　Schematic diagram of experimental device of double-wavelength pumped rubidium vapor

2012 年，该课题组在此实验基础上又创新性地引入波长为 795 nm 的激光调控铷原子从 $5S_{1/2}$ ($F=2$ 或 $F=3$) 到 $5P_{1/2}$($F=3$) 跃迁[28-29]。能级跃迁和装置示意图如图 6 所示，泵浦光 780 nm 和 776 nm 功率分别为 7 mW 和 11 mW，795 nm波长功率小于6 mW。其它实验条件不变，当引入 795 nm泵浦光时，泵浦光波长对应于铷原子 $5S_{1/2}$ ($F=2$) 到 $5P_{1/2}$($F=3$) 跃迁，蓝光出光功率为原来未引入时的两倍; 而当 795 nm 泵浦光波长对应于铷原子 $5S_{1/2}$($F=3$) 到 $5P_{1/2}$($F=3$) 跃迁时，蓝光出光功率降为未引入时的一半。通过微调795 nm 波长实现了对蓝光功率的调控。

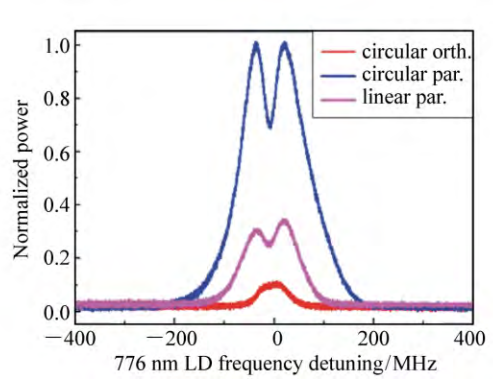


图 5　泵浦光偏振与蓝光功率关系图

Fig. 5　Relationship betweeen pump light polarization and blue laser power

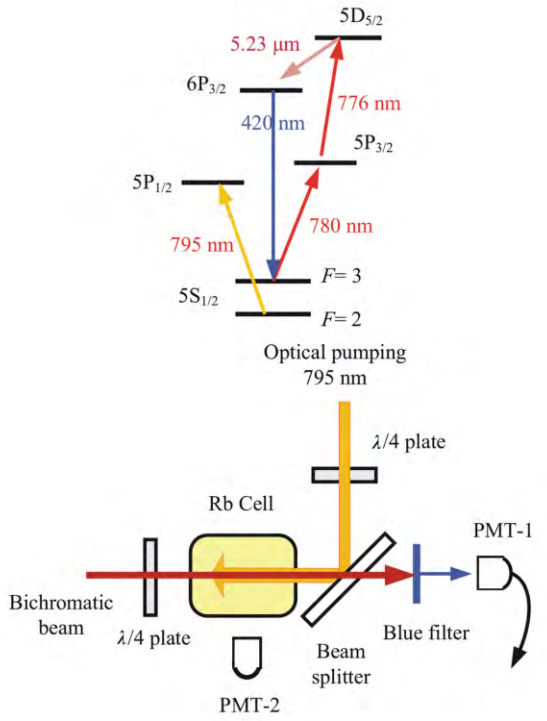


图 6　在铷原子中引入 795 nm 激光能级跃迁及部分实验装置示意图

Fig. 6　Energy level structure of the rubidium atom and part of the experimental device when the 795 nm laser is introduced

2012 年，英国 G. Walker 课题组用双波长泵浦的铷蒸气实验装置研究了涡旋光束在碱金属蒸气中的传递过程[30]，装置如图 7 所示。两束泵浦光 780 nm 和 776 nm 通过空间光调制器(SLM) 产生

各种拉盖尔-高斯模式入射到铷蒸气中，蒸气温度为 120 ℃。为使蒸气的克尔透镜效应降到最低，两束泵浦光频率失调量调整到 $\Delta 780 = -\Delta 776 = 1.6$ GHz。实验通过蓝光和红外光干涉图样发现在每一个非零阶的拉盖尔-高斯模式下，蓝光以涡旋光束的形式输出，泵浦光所有的轨道角动量全部转移到蓝光上。2016 年，澳大利亚 Akulshin 课题组在关于双光子吸收的碱金属激光的轨道角动量传输特性研究中同样有重要发现[31]。首先，双波长泵浦的碱金属光源中泵浦光中的轨道角动量会全部转移到相干蓝光上；其次，碱金属原子密度和泵浦光强在大范围内变化时依旧遵循轨道角动量守恒。另外，如果两个泵浦光带有相同数量而且相反符号的拓扑荷，产生的蓝光是无涡旋特性的。研究结果说明碱金属蒸气四波混频过程中轨道角动量是守恒的，通过这种方式可以实现新波长涡旋光场的产生，具有重要的科研和实用价值。2017 年，韩国浦项科技大学课题组通过铷蒸气的四波混频研究产生蓝光光场的二阶相干性[32]。课题组同样用 780 nm 和 776 nm 两个波长光源泵浦铷蒸气，通过改变两个泵浦光源特性分别以激光光源、热光光源组合进行实验，发现所产生的准直蓝光具有优良的光强相干性，而且光强相干性与两泵浦光的光源特性有直接关系，泵浦光源的相干性会传递到蓝光的二阶相干性上。该特性和轨道角动量特性都与泵浦源密不可分，这些研究说明四波混频中碱金属原子具有极强的原子相干特性。

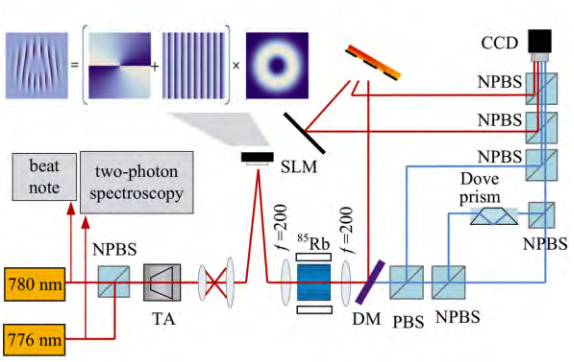


图 7 涡旋光束在碱金属蒸气传递示意图

Fig.7 Transmission of the vortex beam in alkali vapor

表 1 总结了文献中有代表性的双光子吸收碱金属蒸气激光器的研究成果。

表 1 双光子吸收碱金属蒸气激光研究成果

Tab.1 Experimental results of alkali metal vapor laser absorpted by two-photon

增益介质	泵浦光功率 P_p/mW	蒸气池长度/cm	蒸气池温度/℃	蓝光功率 P_{blue}
Cs[33]	30(917 nm) 30(852 nm)	7	110	4 μW(455 nm)
Rb[27]	7(776 nm) 7(780 nm)	5	87	15 μW(420 nm)
Rb[34]	205(776 nm) 390(780 nm)	5	135	9.1 mW
Rb[28]	20(776 nm) 20(780 nm)	5	200	40 μW
Rb[35]	17(776 nm) 25(780 nm)	7.5	122	1.1 mW
Cs[36]	3.6(852 nm)	5	200	0.1 mW

目前虽然对中红外光特性的研究相对较少，但中红外光在蓝光的产生过程中有非常重要的作用，可以为揭示蓝光的产生机理提供更多的信息。2014 年，澳大利亚 Budker 课题组用图 4 所示的铷蒸气实验装置研究了中红外光的光强和频移特性[37]。泵浦光 780 nm 和 776 nm 功率分别为 15 mW和5 mW，用蓝宝石材料作为蒸气池窗口提升中红外光透过率。实验发现中红外光的光强和频移量与第一步激发(将铷原子从基态激发到第一激发态 5P 能级)的泵浦光功率有重要的关系，

中红外激光的频移量会随第一步激发的泵浦光功率的增大而增大。

随后在 2016 年，该课题组研究了中红外光在不同激发方式时的光谱特性[38]。实验装置不变的基础上，只改变两泵浦光相对传输方向。实验对比了两种激发方式的中红外光谱特性，一种是两束泵浦光同向泵浦，多普勒效应的存在会将特定速率的粒子激发到高能级，激发的粒子具有速度选择性; 另一种是两束泵浦光反向泵浦，消多普勒频移效应会将多种速率的粒子激发到高能级。消多普勒频移的激发方式产生的中红外光有更窄的线宽和更高的光强。2017 年，该课题组对两种泵浦激发方式产生的中红外光特性展开深入研究[39-40]。首先实验组通过巧妙的设计，在不另外引入中红外光源的情况下，通过蒸气池内壁对所产生中红外光的部分反射和双波长泵浦源的小角度倾斜入射，实现速度选择激发和消多普勒频移激发产生中红外光特性的对比研究。研究发现消多普勒频移激发方式产生的中红外光在光谱和空间分布有明显的不同，其线宽更窄，产生的光强更大，因此相比于速度选择激发，消多普勒频移激发对相干蓝光的产生达到几倍增幅。同年课题组在前期研究的基础上[28-29]，通过引入 795 nm 波长激光研究两种激发方式对中红外光的影响[40]。实验发现 795 nm 激光对速率激发方式影响更大。随后验证了中红外激光同样具有光强的饱和效应，其光强随泵浦光的增加，增长速率降低，与此同时，铷原子密度变化也会出现类似的饱和效应。

3.2　国内研究进展

2013 年，中科院大连化物所谭彦楠等人首次用单一波长的染料激光器泵浦铷原子，产生波长为 420 nm 的蓝光[41]。实验装置如图 8 所示，用固体激光器抽运的染料激光器产生波长为 778.1 nm的激光，脉冲抽运光参数如下: 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、发散角为 1 mrad。由于蓝光的光强过弱没有测得蓝光输出功率。

随后，2015 年，中科院大连化物所与长春理工大学合作，用同样的装置研究碱金属蒸气池温度，泵浦光的的脉冲能量对蓝光出光功率和效率

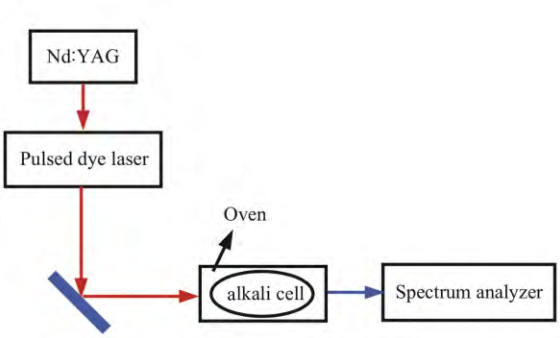


图 8　国内首次实现双光子吸收碱金属蒸气激光输出的实验装置示意图

Fig.8　Schematic diagram of experimental device of two-photon absorption alkali vapor laser output realized in the domestic for the first time

的影响[42]。染料激光器波长为 778.1 nm，线宽为 3 GHz，蒸气池长度为 45 cm，实验发现当蒸气池温度为 170 ℃，泵浦光脉冲功率为 0.85 mJ/pluse 时，脉冲蓝光的能量转换效率最高，超过 1%。

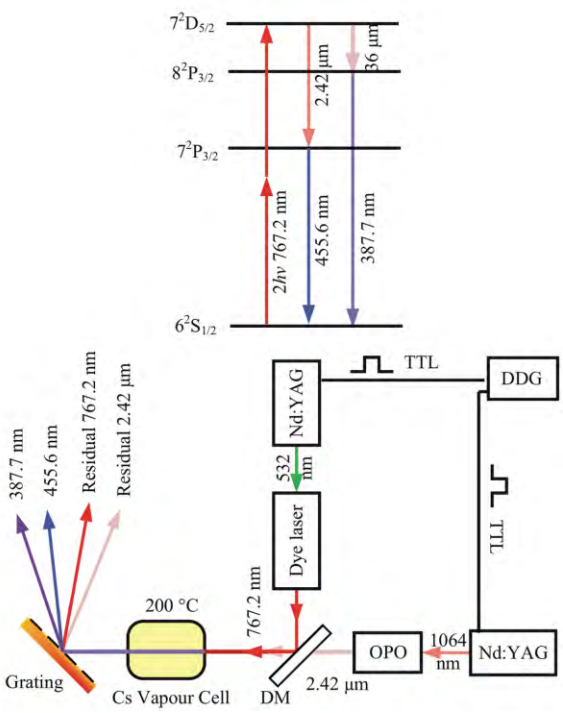


图 9　铯原子能级跃迁及 2.42 μm 激光对非线性过程调控示意图

Fig.9　Transition of cesium atom energy level and the control for nonlinear process by 2.42 μm laser

2016 年，中科院大连化物所谭彦楠等人在单波长泵浦铯蒸气装置基础上增加了 2.42 μm 的

激光对铯蒸气非线性过程进行调控[43]。能级跃迁和装置如图 9 所示，染料激光输出波长为 767.2 nm，脉宽为 2.5 ns，线宽为 0.1 cm^{-1}，重复频率 10 Hz，2.42 μm 激光脉宽同样为 2.5 ns，线宽为 0.2 cm^{-1}，重复频率为 10 Hz。控制脉冲能量约为 0.1 mJ/pluse 的 2.42 μm 激光关闭时，会存在与高能级粒子数有竞争关系的 455.6 nm 蓝光与 387.7 nm 蓝紫光同时输出；控制脉冲能量约为 0.1 mJ/pluse 的 2.42 μm 激光打开时，455.6 nm 蓝光的光强明显随之增强，387.7 nm 蓝紫外光强被抑制，以至于无法测出。由于455.6 nm蓝光与 387.7 nm 蓝紫光存在粒子数竞争关系，用 2.42 μm 激光很好地实现了对输出蓝光波长的调制。

4 影响因素分析

4.1 碱金属原子密度影响特性

碱金属粒子数密度对蓝光的出光功率具有重要的影响。澳大利亚 Akulshin 课题组[27]、美国 E. Brekke 课题组[44]以及大连化物所和长春理工大学合作的谭彦楠等人[42]在实验中都有发现，在原子密度相对较小时（$N<1\times10^{15}$ cm^{-3}），输出相干蓝光功率随原子密度线性增大；当原子密度增大时，输出光功率增长速率显著降低，最后出现功率饱和现象。目前分析有两个方面的原因：首先，温度的变化导致在四波混频过程中泵浦光吸收系数和增益系数发生变化；其次，泵浦光的光斑不均匀性以及束腰位置偏离蒸气池中心等因素，导致了蒸气池前后端对泵浦光的吸收不均匀，蒸气池末端对产生的蓝光再吸收增大，出光功率达到饱和。原子密度对出光效率的影响仍需要继续研究，在改变原子密度的同时需要避免温度变化对测量产生影响。

4.2 泵浦光偏振影响特性

泵浦光的偏振状态直接影响到蓝光产生效率，泵浦光的不同偏振状态对蓝光效率的影响相差很大[27]。这是由于泵浦光的偏振状态和原子基态精细能级有密切关系[45]。当两束泵浦光为相同圆偏振光时，处于上能级的粒子有很大的几率跃迁回到最初泵浦的基态精细能级，构成了一个粒子数循环过程，对应于输出的蓝光有最大的效率；而泵浦光为互相垂直的圆偏振光时，上能级粒子向原子基态另一个精细能级跃迁的几率会大幅度增强，打破了原有的粒子数循环过程，降低了蓝光的输出功率。

4.3 调控激光影响特性

调控激光对输出光效率的影响分为两种方式，第一种是中科院大连化物所谭彦楠等人用四波混频中所需的中红外光来对蓝光光强的调控；另一种是采用其它波长的激光实现对蓝光光强的调控。第一种方式通过引入 2.42 μm 激光提高了 455.6 nm 蓝光的增益系数，因此在与387.7 nm 蓝紫光的粒子数竞争中占有优势。第二种方式通过引入波长 795 nm 的激光，既可以将铷原子基态 $F=2$ 的粒子通过 $5P_{1/2}$ 能级向基态的辐射跃迁过程，最大程度的转移到 $F=3$ 能级，进一步提高非线性光学转换效率；另外还可以通过速率选择激发原理，通过微调 795 nm 的频率失调量来产生特定速率的粒子，用以补偿基态 F=3 精细能级的粒子相对于 $5S_{1/2}$ 到 $5P_{3/2}$ 能级跃迁的频率失调量。不仅如此，通过微调 795 nm 的激光波长（$5S_{1/2}$（$F=3$）$\rightarrow5P_{1/2}$）同样可以使蓝光的光强减少。这种通过激光波长改变粒子在基态不同精细能级分布的方式，为研究出光功率的调控特性提供了一个新思路。

5 展 望

目前，双光子吸收的碱金属激光还处于起步阶段，碱金属蒸气介质对泵浦光的吸收率低，输出光的功率和效率较低。提升吸收效率，实现高光束质量和高功率的激光输出是未来发展的趋势。可以通过以下几种技术路线实现高功率的激光输出。

（1）增加谐振腔。目前功率较低的原因之一是碱金属蒸气对泵浦光吸收不足，谐振腔通过镀膜的方式可以极大地提高泵浦光的吸收效率，同时还可以改善激光模式。

（2）充入缓冲气体。缓冲气体有助于增宽吸收谱线，实现碱金属介质和泵浦光之间线宽匹配，提高吸收效率。

（3）侧面泵浦结构。端面泵浦结构会增加谐

振腔镀膜难度，在高功率下也会受限于注入功率无法提高、热效应严重等因素，侧面泵浦结构可以较好地避免这些问题。

6 总　结

本文详细地从碱金属原子密度，泵浦光的功率、偏振和频率失调量以及调控激光等方面概述了双光子吸收的碱金属激光的发展现状，对工作原理和存在的问题及发展前景进行分析。双光子吸收的碱金属激光器以其优越的特性必将会在未来有重要的发展与应用。

参考文献:

[1] XU D，CHEN F，GUO J，*et al*.. Investigation on 447.3 nm blue-violet laser by extra-cavity frequency doubling of a diode-pumped cesium vapor laser [J] . *Optics & Laser Technology*，2016，83(83)：119-124.

[2] PAYNE S A，BEACH R J，DAWSON J W，*et al* Diode pumped alkali vapor fiber laser: US，US7082148 [P] . 2006.

[3] WANG Y，AN G. Reviews of a Diode-Pumped Alkali Laser(DPAL)：a potential high powered light source [J] . *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*，2015，9521：95211U-95211U-13.

[4] ZWEIBACK J，KOMASHKO A，KRUPKE W F. Alkali-vapor lasers [C] . SPIE LASE，International Society for Optics and Photonics，2010：75810G-75810G-5.

[5] ZHDANOV B V，VENUS G，SMIRNOV V，*et al*.. Continuous wave Cs diode pumped alkali laser pumped by single emitter narrowband laser diode [J] . *Review of Scientific Instruments*，2015，86(8)：021010-1126.

[6] ZHDANOV B，EHRENREICH T，KNIZE R J. Efficient Optically Pumped Cesium Vapor Laser [J] . *Optics Communications*，2006，260(2)：696-698.

[7] KRUPKE W F，BEACH R J，KANZ V K，*et al*.. Resonance transition 795-nm rubidium laser [J] . *Optics Letters*，2003，28(23)： 2336-2338.

[8] WANG R，YANG Z，WANG H，*et al*.. Methane-based in situ temperature rise measurement in a diode-pumped rubidium laser [J] . *Optics Letters*，2017，42(4)：667-670.

[9] KRUPKE W F. Diode pumped alkali laser: US，6643311 [P] . 2003.

[10] EHRENREICH T，ZHDANOV B，TAKEKOSHI T，*et al*.. Diode pumped caesium laser [J] . *Electronics Letters*，2005，41(7)：415-416.

[11] BOGACHEV A V. Diode-pumped caesiumvapour laser with closed-cycle laser-active medium circulation [J] . *Quantum Electronics*，2012，42(2)：95-98.

[12] HURD E J，HOLTGRAVE J C，PERRAM G P. Intensity scaling of an optically pumped potassium laser [J] . *Optics Communications*，2015，357：63-66.

[13] 张元生，徐亮，陈方，等.机载定向红外对抗系统的中波红外激光器及关键技术 [J] .电光与控制，2017，24(5)：56-59.
ZHANG Y SH，XU L，CHEN F，*et al*.. Mid-Infrared lasers used in airborne directed infrared countermeasures systems and its key technologies [J] . *Electronics Optics & Control*，2017，24(5)：56-59.(in Chinese)

[14] WELLS J，KAO C，JANSEN E D，*et al*.. Application of infrared light for in vivo neural stimulation [J] . *Journal of Biomedical Optics*，2005，10(6)：064003.

[15] KASPARIAN J M，WOLF J P. Physics and applications of atmospheric nonlinear optics and filamentation [J] . *Optics Express*，2008，16(1)：466-493.

[16] 李充，谢冀江，潘其坤，等.中红外光学参量振荡器技术进展 [J] .中国光学，2016，9(06)：615-624.
LI C，XIE J J，PAN Q K，*et al*.. Progress of mid-infrared optical parametric oscillator [J] . *Chinese Optics*，2016，9(06)：615-624.(in Chinese)

[17] 李会梅，刘刚，马殿旭，等.红外光谱结合统计分析研究鉴别不同品种菜豆 [J] .光学与光电技术，2015，13(5)：58-63.

LI H M,LIU G,MA D X,*et al*.. Differentiation of six species of phaseolus vulgaris by infrared spectroscopy combined with statistical analysis [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,2015,13(5):58-63.(in Chinese)

[18] 袁林光,薛战理,李宏光,等.低温状态下的材料法向发射率测量 [J].光学 精密工程,2016,24(1):59-64.
YUAN L G,XUE Z L,LI H G,*et al*.. Measurement of normal emissivity of materials at low temperature [J]. *Opt. Precision Eng.*,2016,24(1):59-64.(in Chinese)

[19] 朱祥,张志伟,张文静,等.基于激光外差干涉的金属微振动检测 [J].光学与光电技术,2016,14(6):22-25.
ZHU X,ZHANG ZH W,ZHANG W J,*et al*.. Micro-Vibration metal detection based on laser heterodyne interferometer [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,2016,14(6):22-25.(in Chinese)

[20] 汪鑫,杜辉,王兆港,等.基于激光光源的 4K 超高清 DLP 投影光学引擎的设计 [J].光学与光电技术,2017,15(2):14-19.
WANG X,DU H,WANG Z G,*et al*.. Design of 4K UHD DLP optical engine based on laser light source [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,2017,15(2):14-19.(in Chinese)

[21] 崔建丰,高涛,张亚男,等.全固态 210 nm 准连续深紫外激光器 [J].光学 精密工程,2016,24(10s):212-215.
CUI J F,GAO T,ZHANG Y N,*et al*.. All-solid-state 210 nm quasi-continuous deep ultraviolet laser [J]. *Opt. Precision Eng.*,2016,24(10s):212-215.(in Chinese)

[22] SHIMODA R,SAKATA Y,FUJISE T,*et al*.. The adenoma miss rate of blue-laser imaging vs. white-light imaging during colonoscopy: a randomized tandem trial [J]. *Endoscopy*,2017,49(2):186-190.

[23] CHEN M F,HO Y S,CHUNG C K,*et al*.. Examination of the developed scanning system for red-green-blue laser projector with a feedback control [J]. *Optical Review*,2011,18(1):128-131.

[24] TOGASHI K,NEMOTO D,UTANO K,*et al*.. Blue laser imaging endoscopy system for the early detection and characterization of colorectal lesions: a guide for the endoscopist [J]. *Therapeutic Advances in Gastroenterology*,2016,9(1):50-56.

[25] ZIBROV A S,LUKIN M D,HOLLBERG L,*et al*.. Efficient frequency up-conversion in resonant coherent media [J]. *Phys. Rev. A*,2002,65(5):882-886.

[26] MEIJER T,WHITE J D,SMEETS B,*et al*.. Blue five-level frequency-upconversion system in rubidium [J]. *Optics Letters*,2006,31(7):1002-1004.

[27] AKULSHIN A M,MCLEAN R J,SIDOROV A I,*et al*.. Coherent and collimated blue light generated by four-wave mixing in Rbvapour [J]. *Optics Express*,2009,17(25):22861-22870.

[28] AKULSHIN A M,OREL A A,MCLEAN R J. Collimated blue light enhancement in velocity-selective pumped Rbvapour [J]. *Journal of Physics B Atomic Molecular & Optical Physics*,2012,45(1):015401.

[29] AKULSHIN A,PERRELLA C,TRUONG G W,*et al*.. Frequency evaluation of collimated blue light generated by wave mixing in Rbvapour [J]. *Journal of Physics B Atomic Molecular & Optical Physics*,2012,45(24): 245503-245509.

[30] WALKER G,ARNOLD A S,FRANKEARNOLD S. Frequency translation of orbital angular momentum in four-wave mixing [R]. 2012(No.arXiv:1203.1520).

[31] AKULSHIN A M,NOVIKOVA I,MIKHAILOV E E,*et al*.. Arithmetic with optical topological charges in stepwise-excited Rb vapor [J]. *Optics Letters*,2016,41(6):1146-1149.

[32] YONG SUP IHN,KWANG-KYOON PARK,YOSEP KIM,*et al*.. Intensity correlation in frequency upconversion via four-wave mixing in rubidium vapor [J]. *Journal of the Optical Society of America B*,2017,34(11):2352-2357.

[33] SCHULTZ J T,ABEND S,D RING D,*et al*.. Coherent 455 nm beam production in a cesium vapor [J]. *Optics Letters*,2009,34(15):2321-2323.

[34] DEPAOLA B D,SELL J F,GEARBA M A,*et al*.. Collimated blue and infrared beams generated by two-photon excitation in Rb vapor [J]. *Optics Letters*,2013,39(3):528-531.

[35] VERNIER A,FRANKEARNOLD S,RIIS E,*et al*.. Enhanced frequency up-conversion in Rb vapor [J]. *Optics Express*,2009,18(16):17020.

[36] SULHAM C V,PITZ G A,PERRAM G P. Blue and infrared stimulated emission from alkali vapors pumped through two-photon absorption [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*,2010,101(1-2):57-63.

[37] AKULSHIN A,BUDKER D,MCLEAN R. Directional infrared emission resulting from cascade population inversion and four-wave mixing in Rb vapor [J]. *Optics Letters*,2014,39(4):845-848.

[38] AKULSHIN A,BUDKER D,MCLEAN R J. Amplified spontaneous emission in two-photon excited Rb vapour [C]. Icono/lat,2016.

[39] AKULSHIN A M,BUDKER D,MCLEAN R J. Parametric wave mixing enhanced by velocity insensitive two-photon excitation in Rbvapour [J]. *Journal of the Optical Society of America B*,2017,34(5):1016-1022.

[40] AKULSHIN A M,NAFIA R,SUSLOV S A,*et al*.. Amplified spontaneous emission at 5.23 μm in two-photon excited rubidium vapor [J]. *Journal of the Optical Society of America B*,2017,34(12):2478-2484.

[41] 谭彦楠,李义民,公发全,等.双光子吸收 420 nm 碱金属蒸气蓝光激光器 [J].中国激光,2013,40(10):54-57.
TAN Y N,LI Y M,GONG F Q,*et al*.. 420 nm Alkali blue laser based on two-photon absorption [J]. *Chinese Journal of Lasers*,2013,40(10):54-57.(in Chinese)

[42] GAI B,CAI H,YANG J,*et al*.. Efficient generation of collimated frequency upconversion blue light in rubidium vapor [J]. *Chinese Optics Letters*,2015,13(12):67-70.

[43] GAI B,CAO R,XIA X,*et al*.. Modulation of a double-line frequency up-conversion process in cesium vapor [J]. *Applied Physics B*,2016,122(6):1-7.

[44] BREKKE E,ALDERSON L. Parametric four-wave mixing using a single cw laser [J]. *Optics Letters*,2013,38(12):2147-2149.

[45] KARGAPOL′TSEV,SERGEI V,VELICHANSKY,*et al*.. Optical cascade pumping of the 7P3/2 level in cesium atoms [J]. *Quantum Electronics*,2005,35(7):591-597.

作者简介:



俞航航(1992—),男,山东枣庄人,博士研究生,2015 年于山东师范大学获得学士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学工程硕博连读研究生,主要从事碱金属激光器方面的研究。E-mail: 13021908922@163.com



陈　飞(1982—),男,河南南阳人,副研究员,博士生导师,2011 年于哈尔滨工业大学获得硕博士学位,现工作于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室,主要从事高功率气体激光器及其应用方面的研究。E-mail: feichenny@126.com