

## 海洋应用高峰值功率蓝光脉冲激光器技术研究

马剑<sup>1</sup>, 朱小磊<sup>1,2\*</sup>, 陆婷婷<sup>1</sup>, 马浩达<sup>1</sup><sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所中科院空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 海洋探测激光雷达和 underwater 无线光通信应用对激光发射源的波长、重复频率和峰值功率等均提出了特殊的要求。具有高峰值功率的蓝绿波段纳秒脉冲激光, 尤其是在大洋水中衰减系数更小的蓝光, 在海洋主动遥感和信息高速传输中有着十分重要的应用。对国内外蓝光脉冲激光器技术的发展现状进行了综述, 并从高重复频率、多波长和大能量、高峰值功率两种类型的应用需求出发, 详细介绍了针对 486.1 nm 夫琅禾费暗线的蓝光脉冲激光器的最新研究工作。

**关键词** 激光器; 蓝绿激光; 夫琅禾费暗线; 光学参量振荡器; 非线性频率变换

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1714002

## Research on Pulsed Blue Laser with High Peak Power for Ocean Applications

Ma Jian<sup>1</sup>, Zhu Xiaolei<sup>1,2\*</sup>, Lu Tingting<sup>1</sup>, Ma Haoda<sup>1</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The applications of ocean exploration lidars and underwater wireless laser communications put forward special requirements for the wavelength, repetition rate, and peak power of the laser source. The nanosecond pulsed blue-green laser with high peak power, especially blue laser with smaller attenuation coefficient in ocean water, is widely required for active oceanic remote sensing and high-speed information transmission. In this paper, the development status of blue pulsed lasers is reviewed, and the recent research on blue pulsed lasers emitting at the Fraunhofer line of 486.1 nm is introduced in detail from the perspective of two application scenarios, i. e., one with high repetition rate and multiple wavelengths and the other with high energy and high peak power.

**Key words** lasers; blue-green laser; Fraunhofer line; optical parametric oscillator; nonlinear frequency conversion

## 1 引言

传统的水下目标探测和信息传输依赖于声学技术, 基于声学机制的声呐探测和水声通信技术存在效率低、速率低、隐蔽性差和无法跨海-气界面工作的弱点, 进而无法实现飞机平台或卫星平台的海洋遥感应用。此外, 海水介质的弱导电特性会使得其对入射的电磁波(微波)产生趋肤效应, 引入严重的衰减损耗, 这大大限制了微波穿透海水水体深度的能力, 成为难以突破的技术瓶颈。

1963年, Duntley等<sup>[1]</sup>深入研究了可见光在海水中

的传播特性, 发现蓝绿波段(450~550 nm)光波在海水中传播时具有衰减最小的特性, 进而证实了海水介质存在一个类似大气介质透光特性的海水透光窗口。尽管如此, 激光在海水中的损耗随海水水质的不同仍会出现显著的变化, 根据 Jerlov 和 Koczy<sup>[2]</sup>水质分类, 不同水质的海水的最佳透光光谱波长是不同的。在近岸浅海区, 海水的最佳透光光谱窗口在 510~550 nm 附近, 而对于远洋深海, 海水的最佳透光光谱窗口向蓝光方向发生频移, 最大透过率出现在 450~490 nm 的蓝光波段内。海水透光窗口的存在为蓝绿光波段的海洋应用提供了一个新的思路, 即利用蓝绿光波在海水介

收稿日期: 2022-05-20; 修回日期: 2022-06-10; 录用日期: 2022-06-20

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(61991453)、上海市青年科技英才扬帆计划(19YF1453600)

通信作者: \*xlzhu@siom.ac.cn

质中的高透过率特性,综合脉冲激光本身的亮度高、方向性强、单色性好和可实现高峰值功率输出等特点,达到跨介质海洋激光遥感探测和 underwater 大容量、高码率信息传输的目的。

机载激光雷达具有探测精度高、测量可覆盖区域广、测点密度高、测量周期短、消耗低、易管理和机动性高等特点,已受到广泛的重视。用于海洋环境要素探测的海洋激光雷达,具有对浅海水深、海底地貌、海洋油污、海洋叶绿素和 underwater 目标探测的能力,在资源调查、海洋权益维护等军民领域中均具有重要的应用潜力。具有海洋/陆地环境要素同时测绘功能的机载双频/多频激光雷达<sup>[3]</sup>因其能够快速、高效地实现海陆一体化探测,已在海洋开发、海岸带测绘、海洋调查和环境监测等领域中发挥重要作用。然而,目前被广泛采用的海洋探测激光雷达的典型激光发射波长为技术成熟的红外(1064 nm)和绿光(532 nm)<sup>[4]</sup>。

类似地,在信息传输应用方面,鉴于蓝绿脉冲激光在海水中具有较低的传输损耗,显示出强穿透能力,故将蓝绿脉冲激光作为水下高速通信系统的光发射源,可以有效提升水下无线光通信能力。相比于传统的水下声波通信技术,蓝绿激光水下通信技术具有通信频带宽、数据传输能力强、光束发散角小、保密性高、通信速率高、终端质量小和功耗小等特点,已成为水下高速通信领域中的研究热点。

无论是海洋激光雷达系统还是水下激光通信系统,有效抑制太阳背景光噪声干扰是其实现全天时高效、稳定工作的关键。研究表明,在海水的蓝光透光窗口光谱范围内,存在一条比较明显的太阳辐射光谱暗线,即夫琅禾费暗线(H-β线),中心波长为 486.13 nm。显然,只要将激光发射光源的中心波长落在太阳暗线上,且激光光谱线宽和光电探测器(PD)滤光片带宽均小于 H-β 线谱宽(约为 0.1 nm),就能够明显地降低太

阳光背景噪声对接收系统的影响,显著提高光电探测器的信噪比。刘群等<sup>[5]</sup>从海水探测深度和信噪比两方面分析了海洋激光雷达探测全球海洋光学参数的最佳波长,结果表明,486 nm 蓝光波长在有效提升全球海洋探测深度和回波信噪比方面具有明显的优势,是海洋激光雷达光源波长的最佳选择。中国科学院上海光学精密机械研究所研发的 486 nm 波长蓝光机载海洋激光雷达成功实现了穿透深度大于 100 m 的海水剖面参数测量<sup>[6]</sup>,实验验证了蓝光光源的优势。

本文瞄准蓝绿激光海洋应用的需求,系统概述了全固态蓝光脉冲激光器技术的发展历程,并着重介绍了本团队在研发适合星载/机载平台的大能量、高重复频率的 486 nm 波长的蓝光脉冲激光器方面的最新研究进展。

## 2 蓝光脉冲激光器技术研究现状

在全固态激光器技术发展历程中,实现高峰值功率蓝光激光脉冲输出的典型技术路线:1)在利用激光二极管(LD)泵浦的 Nd<sup>3+</sup>离子掺杂准三能级调 Q 激光器输出 0.9 μm 的基频激光脉冲后,倍频获得蓝光激光脉冲;2)在 LD 泵浦的掺 Nd<sup>3+</sup>增益介质<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub>能级跃迁产生 1.3 μm 波段的脉冲激光后,三倍频获得蓝光激光脉冲;3)掺杂激活离子的光纤脉冲激光振荡器/放大器通过多次倍频技术获得蓝光激光脉冲输出;4)脉冲激光泵浦晶体光学参量振荡器(OPO)/参量放大器获得蓝光激光输出。

### 2.1 国外蓝光脉冲激光器技术研究现状

2001年,美国 Q-Peak 公司利用主振荡功率放大(MOPA)激光器系统作为泵浦源,采用腔内倍频参量振荡器和腔外倍频技术,成功实现了红绿蓝(RGB)三种波长脉冲激光的同时输出<sup>[7]</sup>,如图 1 所示。作为泵浦源的 524 nm 绿光脉冲激光器,在 22.5 kHz 的重复频率

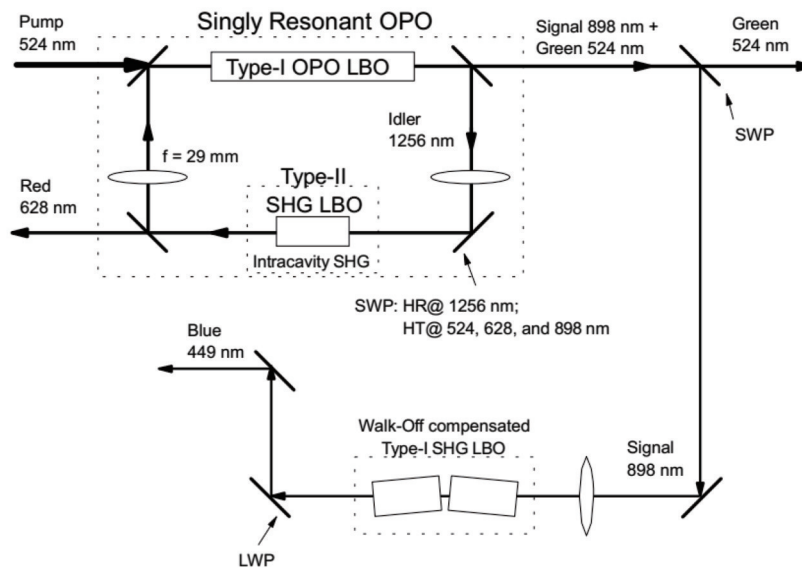


图 1 RGB-OPO 激光器原理光路图<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Optical path diagram of RGB-OPO laser<sup>[7]</sup>

条件下,抽运单谐振四镜环形腔三硼酸锂(LBO)-OPO(I类相位匹配切割)振荡器,产生的898 nm信号光的最大输出功率可达13 W,再经过由走离补偿的两块LBO倍频晶体(SHG)组成的倍频器可获得最大功率为3.4 W的449 nm的蓝光脉冲输出,单脉冲能量可达0.15 mJ,倍频效率约为26%。

2012年,美国Fibertek公司<sup>[8]</sup>成功研发了一款可直接倍频产生455 nm蓝光激光脉冲的新型911 nm掺铈光纤激光放大器,在10 kHz重复频率下,经过两级光纤放大,最终可获得峰值功率为5 W、单脉冲能量为2.6 μJ的911 nm放大脉冲输出。基于该全光纤激光放大器的蓝光脉冲光源的最大特点是可显著降低蓝光

激光器的复杂程度,但由于脉冲峰值功率相对偏低,故其应用受到了限制。2013年,美国洛克希德·马丁公司<sup>[9]</sup>报道了基于掺铥光纤激光放大器(MOPA)的蓝光脉冲激光器,该激光器的主振荡器为重复频率为10 kHz的调Q激光器,1940 nm基频的输出平均功率为700 mW,脉冲宽度为70 ns。基频光脉冲经掺铥大模场(LMA)光纤放大器放大后,被周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体和LBO晶体级联倍频,最终可获得485 nm的蓝光激光脉冲输出,最大功率为1.2 W,单脉冲能量为0.12 mJ,脉冲宽度约为65 ns,蓝光的光束质量因子 $M^2$ 为1.3,如图2所示。

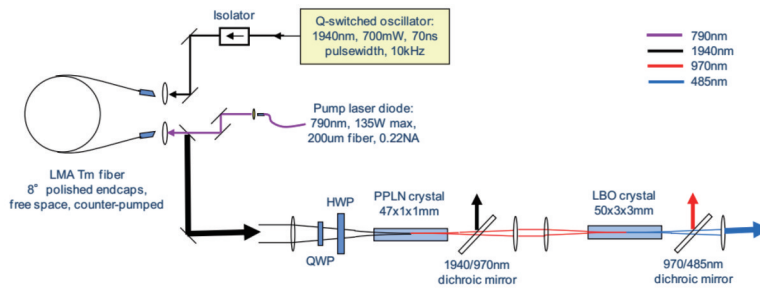


图2 掺铥光纤激光器实现485 nm蓝光激光输出示意图<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of 485 nm blue laser output by thulium-doped fiber laser<sup>[9]</sup>

2013年,法国巴黎南大学Deyra等<sup>[10]</sup>采用Nd:YAG单晶光纤作为增益介质,采用声光调Q技术,在重复频率为10 kHz时,成功获得平均功率为8 W的946 nm激光脉冲输出,脉冲宽度为30 ns。经

BBO晶体腔外倍频后,最终可获得473 nm蓝光脉冲激光输出,单脉冲能量为0.3 mJ,光束质量因子为 $M_x^2 = 1.38$ 和 $M_y^2 = 1.12$ 。激光器原理光路如图3所示。

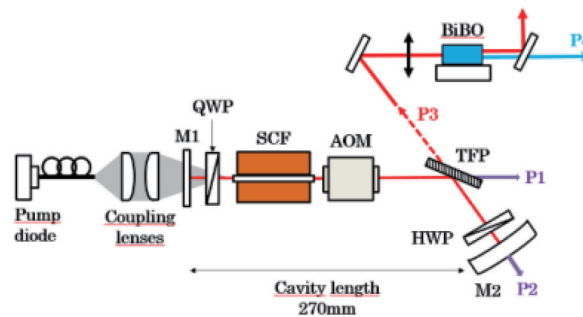


图3 声光调Q Nd:YAG单晶光纤激光器实验装置图<sup>[10]</sup>

Fig. 3 Experimental setup of acousto-optic Q-switched Nd:YAG single-crystal fiber laser<sup>[10]</sup>

为了获得更大能量的473 nm蓝光激光脉冲,2015年, Van等<sup>[11]</sup>设计了垂直腔表面发射激光器(VCSEL)侧面泵浦Nd:YAG晶体的声光调Q激光器,采用BBO晶体腔外倍频技术,当重复频率为70 Hz时,获得了最高脉冲能量为9.3 mJ的473 nm蓝光脉冲输出,脉冲峰值功率达到0.35 MW。虽然倍频效率达到了52%,但是激光器的整体效率偏低,仅有0.4%。图4为该激光器的原理光路图。

2016年,英国航空航天系统公司<sup>[12]</sup>报道了最接近太阳光谱H-β线的蓝光激光实验结果,如图5所示。由1550 nm脉冲激光泵浦掺铥增益开关光纤激光器,

获得平均功率为600 mW、脉冲宽度约为60 ns的1946 nm中红外激光输出,经过掺铥光纤放大器放大后,获得最大功率为16.9 W的1946 nm激光脉冲输出。1946 nm基频光经两级MgO:PPLN晶体级联倍频后,最终可获得平均功率为1.9 W的486.5 nm蓝光激光脉冲输出,单脉冲能量达到3.8 μJ。

## 2.2 国内全固态蓝光脉冲激光器技术研究现状

国内最早以激光雷达应用为牵引的蓝光脉冲激光器研究工作始于2009年,中国科学院上海光学精密机械研究所Rong等<sup>[13]</sup>采用重复频率为10 Hz的532 nm Nd:YAG脉冲激光器泵浦钛宝石激光器,获得了脉宽

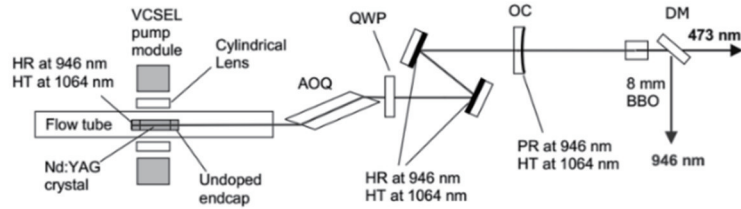


图 4 VCSEL 侧面泵浦 Nd:YAG 蓝光激光器原理示意图<sup>[11]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of VCSEL side-pumped Nd:YAG blue laser<sup>[11]</sup>

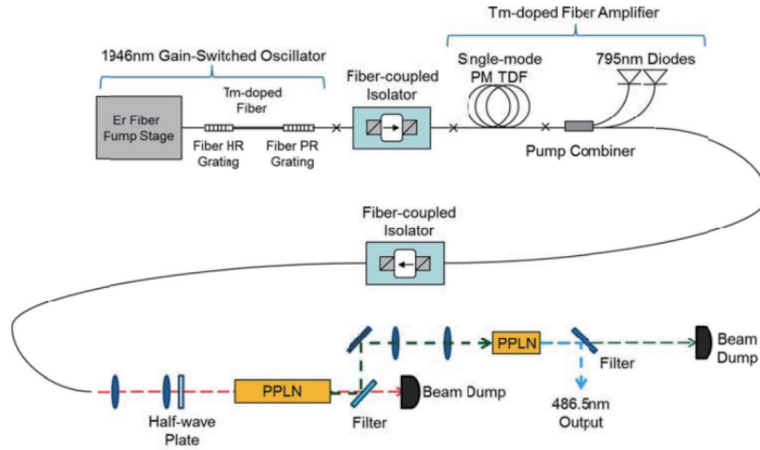


图 5 四倍频 1946 nm 光纤激光放大器原理示意图<sup>[12]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of quadruple frequency 1946 nm fiber laser amplifier<sup>[12]</sup>

约为 20 ns 的 910 nm 基频窄线宽激光脉冲输出,再经 I 类相位匹配 BBO 晶体腔外倍频,最终可获得单脉冲能量为 3.43 mJ 的 455 nm 蓝光输出,脉冲峰值功率可达到 0.17 MW。同年,长春理工大学 Yu 等<sup>[14]</sup>报道了在 LD 泵浦 Nd:YAP 电光调 Q 激光器中,采用腔内倍

频、和频技术,获得了平均功率为 3.2 W 的 447 nm 蓝光激光脉冲输出,当重复频率为 1 kHz 时,单脉冲能量可达到 3.2 mJ,脉冲宽度约为 10 ns,峰值功率可达 0.32 MW,实验装置如图 6 所示。

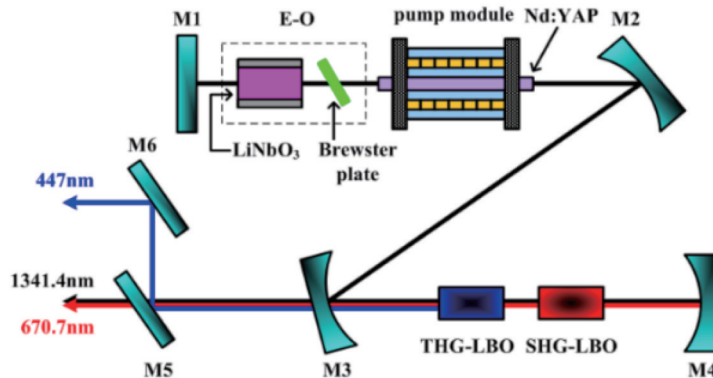


图 6 电光调 Q Nd:YAP 蓝光激光器实验装置示意图<sup>[14]</sup>

Fig. 6 Experimental setup of electro-optic Q-switched Nd:YAP blue laser<sup>[14]</sup>

2010 年,哈尔滨工业大学报道了高重复频率蓝光脉冲激光器,采用 LD 端面泵浦设计,实现声光调 Q Nd:YAG 激光器 946 nm 波长基频激光输出,再通过 BBO 晶体腔外倍频,最终可获得 473 nm 蓝光激光脉冲,脉冲宽度约为 9 ns<sup>[15]</sup>。在 10 kHz 重复频率下,蓝光脉冲的峰值功率为 16.7 kW。图 7 为该激光器的示意图。

2015 年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 Chen 等<sup>[16]</sup>在声光调 Q Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器中,采用腔内倍频技术,成功获得了最高平均功率大于 0.6 W 的 456 nm 蓝光激光脉冲输出,重复频率为 10 kHz,脉冲宽度约为 21.3 ns,相应的脉冲峰值功率仅为 2.3 kW。

2019 年,中国科学院上海光学精密机械研究所 Lu

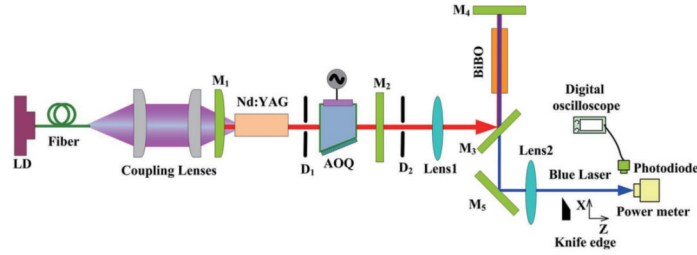


图 7 高重复频率 473 nm 蓝光激光器示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 7 Experimental setup of high repetition rate 473 nm blue laser<sup>[15]</sup>

等<sup>[17]</sup>采用 LD 端面抽运设计,在电光调 Q、传导冷却的 Nd:YAG 激光器中,采用 LBO 晶体腔外倍频技术,获得了单脉冲能量大于 2 mJ 的 473 nm 蓝光脉冲激光输

出,将峰值功率提升到了 0.2 MW,对应光束质量因子分别为  $M_x^2 = 2.4$  和  $M_y^2 = 2.3$ 。图 8 是该紧凑型设计蓝光激光器的原理图。

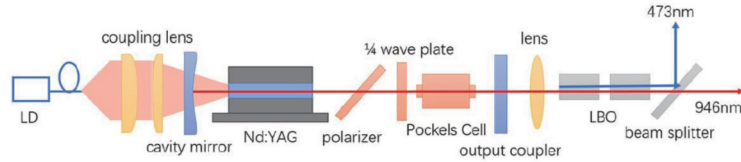


图 8 电光调 Q 473 nm 蓝光激光器原理图<sup>[17]</sup>

Fig. 8 Experimental setup of electro-optic Q-switched 473 nm blue laser<sup>[17]</sup>

表 1 汇总了文献报道的国内外蓝光脉冲激光器的主要参数。虽然蓝光激光的波长覆盖了 449.0~486.5 nm,重复频率覆盖了 10 Hz~500 kHz,但是脉冲峰值功率普遍较低,最高的脉冲峰值功率也仅为 0.35 MW@70 Hz,与海洋激光雷达的实际应用需求尚存在差距。目前,为了满足探测深度的需求,机载海洋

激光雷达常用的绿光激光发射源的峰值功率一般不小于 1 MW<sup>[18]</sup>。国内外瞄准太阳光谱 H-β 暗线的蓝光脉冲激光器研究工作鲜有报道。当前,由于缺乏能直接辐射 486 nm 蓝光的高性能增益介质,因此非线性频率转换技术被认为是获得蓝光 486 nm 波长输出的有效途径。

表 1 国内外蓝光脉冲激光器的主要参数汇总

Table 1 Summary of main parameters of blue pulsed lasers at home and abroad

Country	Wavelength /nm	Pulse energy /mJ	Repetition rate /kHz	Pulse width /ns	Peak power /kW	Year
USA	449	0.15	22.5	50	3	2001
USA	455	0.0026	10	520	0.005	2012
USA	485	0.12	10	70	1.7	2013
France	473	0.3	10	30	10	2013
USA	473	9.3	0.07	27	344	2015
Britain	486.5	0.0038	500	60	0.063	2016
China	455	3.43	0.01	20	171.5	2009
China	447	3.2	1	10	320	2009
China	473	0.15	50	9	16.7	2010
China	456	0.0623	10	21.3	2.3	2015
China	473	2	0.1	10	200	2019

### 3 基于单谐振光学参量振荡器的 486 nm 蓝光脉冲激光技术研究

为了满足星载和机载平台海洋激光雷达系统的应用需求,本团队自 2018 年起,开展基于单谐振 OPO 的 486 nm 蓝光脉冲激光技术研究工作。采用该技术路线,克服了准三能级固体激光器和光纤激光器无法获得高功率输出的缺点,充分利用技术成熟的

1064 nm 脉冲激光作为基频光开展非线性频率变换,具有波长可调谐的优点。下面分别从高重复频率 H-β 暗线蓝光脉冲激光器和大能量 H-β 暗线蓝光脉冲激光器研究工作的进展展开介绍。

#### 3.1 5 kHz 重复频率的 486 nm 蓝光激光器研究

考虑到海洋探测中存在水体衰减、散射和退偏等因素的影响,要求激光雷达具有较高的垂直分辨率和更多波长来获取海表、海水和海底的精细三维光谱结

构。为满足该需求,本课题组开展了千赫兹重复频率并可同时输出包含 486 nm 蓝光的五波长线偏振全固态激光源的研究工作。355 nm 紫外光可用于海水中悬浮物质和叶绿素等水色要素的受激荧光探测。486 nm 和 532 nm 蓝绿光能够穿透水体,实现水深和偏振探测,尤其是 486 nm 波长能够匹配太阳的夫琅禾费暗线,具有较低的背景光干扰,进而能够提升雷达在白天的探测能力。1064 nm 和 1313 nm 近红外光可用于海陆地形测量。激光器的重复频率为 5 kHz,可以显著提高机载海洋雷达的探测点密度,提高水平分辨率。激光脉宽约为 2 ns,短脉冲具有的高峰值功率有助于

提升激光在海水中的穿透能力,并获得高测量精度。

高重复频率 486 nm 蓝光激光器原理示意图如图 9 所示,其中 OC 为输出耦合镜,HR 为全反镜,TFP 为薄膜偏振片。以 LD 端面泵浦的电光调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器作为主振荡器,采用多级串联的 LD 端面泵浦功率放大结构设计,获得高光束质量 1064 nm 基频激光脉冲输出。基频激光脉冲经倍频、和频非线性转换过程后获得 532 nm 绿光和 355 nm 紫外激光脉冲输出。进一步用 355 nm 紫外激光泵浦 BBO 晶体 OPO,获得 486 nm 信号光和 1313 nm 空闲光脉冲输出。

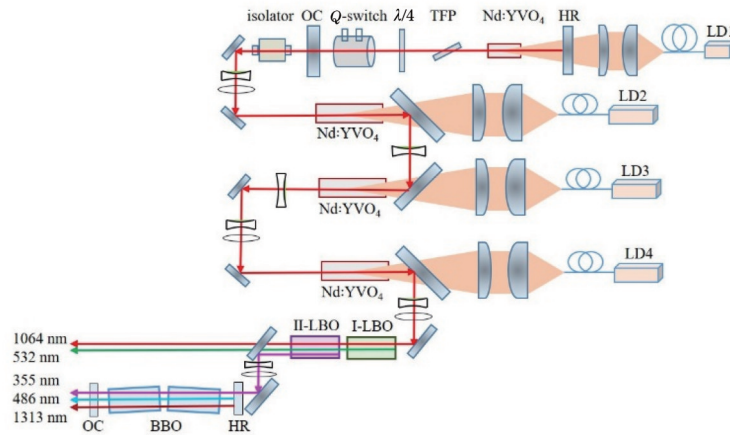


图 9 高重复频率 486 nm 蓝光激光器原理示意图

Fig. 9 Experimental setup of high repetition rate 486 nm blue laser

1064 nm 主振荡器的泵浦源为光纤输出 LD 模块,中心波长为 808 nm,重复频率为 5 kHz,泵浦脉冲宽度为 110  $\mu$ s,最大输出峰值功率为 30 W。增益介质 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的尺寸为 3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 5 mm,原子数分数为 0.5%。采用 BBO 普克尔盒作为 Q 开关。在最大泵浦功率下,仿真计算了 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的热透镜焦距值,分别为  $f_x=340$  mm 和  $f_y=332$  mm。实验中设计了平-凸谐振腔结构来补偿增益介质的热透镜效应,在达到热稳定的同时,满足激光振荡模与增益介质内激活区体积的匹配要求,以提高激光效率和光束质量。激光晶体采用紫铜热沉传导冷却的方式实现热管理。激光放大器为三级级联的 LD 端面泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体结构。三级放大器的泵浦源 LD2、LD3 和 LD4 均采用最高峰值功率为 150 W 的 808 nm 光纤耦合 LD 模块,泵浦脉冲宽度取 90  $\mu$ s。放大器中 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体的尺寸为 3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 15 mm,原子数分数为 0.35%。晶体温控同样采用热沉传导冷却的方式。倍频晶体为 I 类匹配的 LBO 晶体,尺寸为 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 15 mm,切割角为  $\theta=90^\circ$  和  $\varphi=11.4^\circ$ 。和频晶体 (THG) 为 II 类匹配 LBO 晶体,尺寸为 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 15 mm,切割角为  $\theta=42.5^\circ$  和  $\varphi=90^\circ$ 。倍频晶体与和频晶体都采用半导体制冷器 (TEC) 控温,避免因温度变化引起的相位失配现象的出现。和频产生的紫外 355 nm 脉冲激光作为单谐振 OPO 的泵浦源。单

谐振 OPO 振荡腔采用平-平腔结构设计,泵浦输入腔镜对泵浦光增透,对 486 nm 信号光全反。输出耦合镜对 486 nm 信号光的透射率为 30%,OPO 的两个腔镜对 1313 nm 空闲光的透射率均为 70%。参量晶体采用两块 I 类相位匹配切割的 BBO,交叉对称放置以补偿走离效应。BBO 晶体尺寸为 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 20 mm,切割角为  $\theta=29.6^\circ$  和  $\varphi=90^\circ$ ,晶体两端镀有 355 nm、486 nm 和 1313 nm 增透膜。BBO 参量晶体采用 TEC 控温,可通过精细调节 TEC 温度,实现 OPO 输出信号光波长稳定。

当 1064 nm 基频光输出功率为 15 W 时,获得的 355 nm 紫外激光的最大平均功率为 6.3 W,最大单脉冲能为 1.26 mJ,三倍频转换效率为 42%。由图 10 的三倍频输出功率曲线可以看出,在最大基波功率附近,三倍频效率出现下降趋势。图 11 给出了 1064 nm 基频脉冲和 355 nm 紫外脉冲的时间波形对比,脉冲宽度分别为 2.0 ns 和 1.9 ns,紫外脉冲的脉冲宽度略窄于基波的脉冲宽度。

在采用相同长度(晶体长度为 20 mm)的 BBO 参量晶体的条件下,对比了不同腔长(L)、不同输出耦合率(T)条件下的 OPO 信号光输出功率曲线,如图 12 所示。由结果可知,较短的腔长与较高的输出耦合透过率可获得较高的信号光输出。当泵浦功率为 4.2 W 时,486 nm 蓝光输出功率可达到峰值,约为

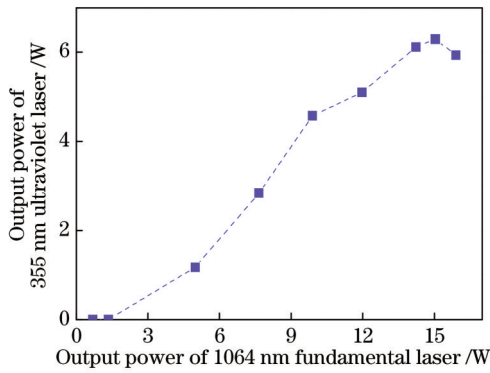


图 10 355 nm 紫外光输出功率曲线

Fig. 10 Output power curve of 355 nm ultraviolet laser

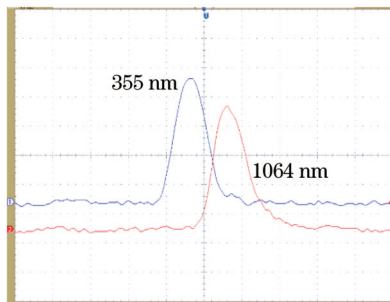


图 11 基频光和紫外光的脉冲波形

Fig. 11 Pulse profiles of fundamental laser and ultraviolet laser

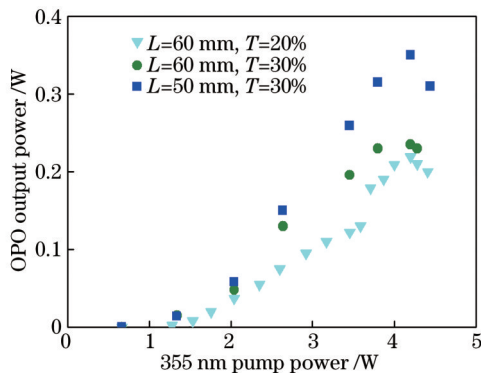


图 12 单块晶体 OPO 输出信号光功率曲线

Fig. 12 Output power of signal laser in single crystal OPO

0.35 W, 对应的单脉冲能量为 70  $\mu\text{J}$ 。继续增大 355 nm 泵浦光功率, OPO 信号光输出功率出现下降趋势。进一步对比研究了参量晶体长度对 OPO 输出信号光效率的影响。在同样的单谐振 OPO 结构中, 改用两块 BBO 参量晶体旋转对称放置, 且晶体有效增益长度增加到 40 mm。在相同的紫外激光泵浦条件下, OPO 最大输出蓝光激光功率提升到了 1 W, 最大单脉冲能量达到了 0.2 mJ, 峰值功率大于 0.1 MW。此时, OPO 转换效率提升到了 16.7%, 测得 1313 nm 空闲光脉冲的输出能量为 0.04 mJ。蓝光脉冲波形如图 13 所示, 脉冲宽度为 2.0 ns。

### 3.2 大能量的 486 nm 蓝光脉冲激光器研究

为满足星载海洋探测激光雷达对百毫焦量级大能量输出蓝光脉冲激光源的需求, 本课题组提出了如图

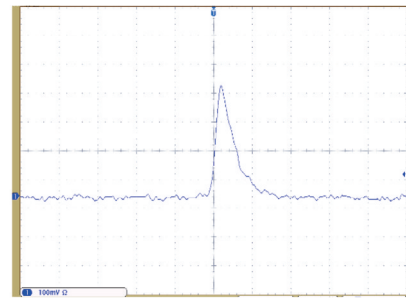


图 13 OPO 输出信号光脉冲波形

Fig. 13 Pulse profile of OPO output signal laser

14 所示的技术路线, 开展基于单谐振 OPO 技术的大能量 486 nm 波长蓝光脉冲激光器的研究工作。从功能上区分, 激光器系统主要由种子注入主振荡器、多级级联功率放大器、谐波转换模块和 OPO 环形振荡器组成。其中, EOM 为电光 Q 开关, AMP 为激光放大器。

将自研的非平面环形腔(NPRO)单频种子激光注入 LD 双端面泵浦 Nd:YAG 电光调 Q 激光振荡器中, 获得的窄线宽 1064 nm 脉冲激光依次通过四级 LD 侧面泵浦 Zig-Zag 板条放大器进行功率放大, 最终可获得最大能量大于 770 mJ 的 1064 nm 基频脉冲输出。谐波转换模块由一块 I 类相位匹配 LBO 倍频晶体和一块 II 类相位匹配 LBO 和频晶体级联组成。LBO 晶体尺寸皆为 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 15 mm。单谐振 OPO 采用三镜环形腔结构设计, 几何腔长为 135 mm。OPO 谐振腔的三个腔镜均对 355 nm 波长的泵浦光和 1313 nm 的空闲光波长增透, 输出耦合镜对 486 nm 蓝光的透过率为 50%, 其余两个腔镜则对 486 nm 波长全反。参量晶体为两块 I 类相位匹配 BBO, 切割角为  $\theta=29.6^\circ$  和  $\varphi=90^\circ$ , 尺寸大小为 12 mm $\times$ 12 mm $\times$ 20 mm。两块参量晶体相对于泵浦光轴交叉对称放置以补偿走离效应。为获得匹配夫琅禾费暗线波长的信号光的输出, 实验通过精细调整 BBO 晶体相对泵浦光轴的偏转角度来实现。

在 100 Hz 重复频率下, 单谐振 OPO 蓝光脉冲输出能量随 355 nm 泵浦脉冲能量的变化曲线如图 15 所示。当泵浦脉冲能量为 300 mJ、泵浦光斑能量密度达到 0.85 J/cm $^2$  时, OPO 获得了大于 110 mJ 的蓝光脉冲能量输出, 脉冲峰值功率大于 11 MW。OPO 信号光的转换效率约为 36.7%。由于 OPO 振荡腔是平-平腔结构, 故 OPO 输出信号光远场发散角偏大, 分别为  $\theta_x=7.3$  mrad 和  $\theta_y=5.6$  mrad, 脉冲宽度小于 10 ns。图 16 给出了光谱仪测得的 OPO 输出信号光中心波长为 486.1 nm 时的光谱曲线, 光谱的半峰全宽 (FWHM) 小于 0.13 nm。

为了进一步压缩单谐振 OPO 蓝光激光的光谱线宽, 获得窄线宽输出, 实验上将一个中心波长为 487.99 nm 的连续输出单频激光器作为种子源, 注入到单谐振 OPO 内, 种子激光光谱如图 17 所示, OPO 输出信号光的光谱线宽明显变窄, 如图 18 所示, 此时中心波长为 488.00 nm, 蓝光激光脉冲的光谱线宽

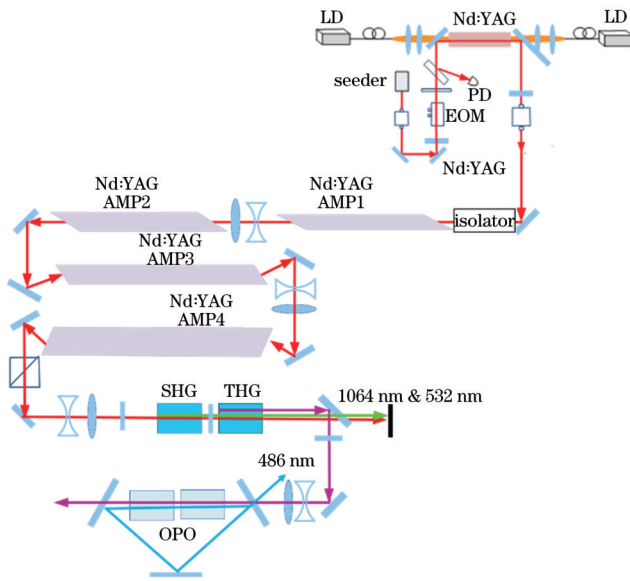


图 14 大能量蓝光脉冲激光器原理图

Fig. 14 Experimental setup of high energy blue pulsed laser

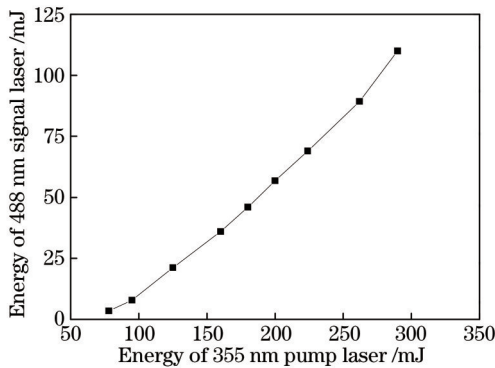


图 15 OPO 信号光能量随泵浦光能量的变化曲线

Fig. 15 OPO signal laser energy varying with pump laser energy

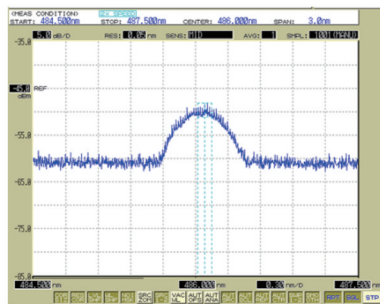


图 16 OPO 蓝光输出光谱图

Fig. 16 Output spectrum of OPO blue laser

(3 dB) 小于 0.01 nm。实验中由于缺乏中心波长为 486.13 nm 的种子激光器, 故没有演示线宽小于 H-β 暗线带宽的大能量蓝光激光输出。

本文研究的两类 486 nm 蓝光脉冲激光器主要参数的汇总如表 2 所示, 其中千赫兹高重复频率激光器可满足机载激光雷达应用的需求, 百赫兹大能量激光器可满足更远距离的水下激光通信和大深度探测的

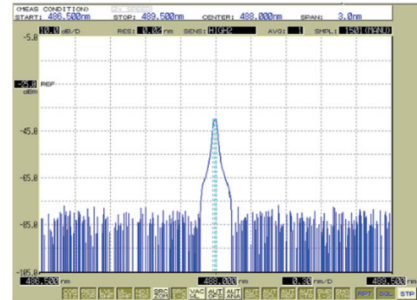


图 17 蓝光种子源光谱

Fig. 17 Spectrum of blue laser seed

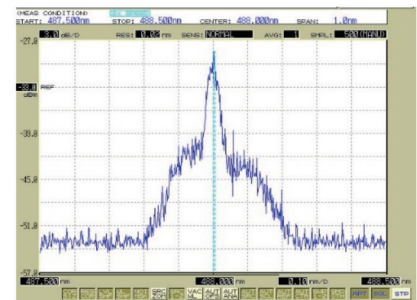


图 18 种子注入 OPO 蓝光的光谱

Fig. 18 Spectrum of seeded OPO blue laser

需求。

表 2 本文研究的蓝光脉冲激光器的主要参数汇总

Table 2 Summary of main parameters of blue pulsed lasers in this paper

Wavelength / nm	Pulse energy / mJ	Repetition rate / Hz	Pulse width / ns	Peak power / MW
486	0.2	5000	~2	0.1
486	110	100	~9	12.2



## 4 结 论

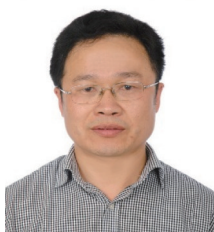
不断拓展的激光海洋应用领域对高重复频率高平均功率、低重复频率大脉冲能量输出的蓝绿全固态激光器的要求不断提高。随着高光谱探测技术在海洋探测领域中的应用,具有稳频/锁频功能的单频大能量蓝绿激光器的需求将会越来越迫切。

现有的非线性谐波转换技术,尤其是采用单频种子注入的参量振荡/参量放大技术路线,可以实现窄线宽、大能量蓝光激光脉冲输出,脉冲峰值功率达到兆瓦量级,可满足海洋探测激光雷达的需求,但存在转换过程复杂、效率偏低和中心波长易漂移等不足。最大的挑战在于光学元器件、非线性晶体在高峰值功率紫外激光作用下产生的光损伤问题,这会导致激光器系统的稳定性和可靠性大大降低。寻找能直接输出蓝光波段,或经过单次谐波转换过程就能获得蓝光输出的高质量增益晶体,应该是未来发展大能量、高重复频率蓝光脉冲激光器发展的方向。

### 参 考 文 献

- [1] Duntley S Q. Light in the sea[J]. Journal of the Optical Society of America, 1963, 53(2): 214-233.
- [2] Solonenko M G, Mobley C D. Inherent optical properties of Jerlov water types[J]. Applied Optics, 2015, 54(17): 5392-5401.
- [3] 胡善江, 贺岩, 陈卫标, 等. 机载双频激光雷达系统设计和研制[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(9): 0930001.  
Hu S J, He Y, Chen W B, et al. Design of airborne dual-frequency laser radar system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(9): 0930001.
- [4] 陆俊, 丁建永, 贺岩, 等. 机载激光雷达用高重复频率亚纳秒双波长全固态激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 082804.  
Lu J, Ding J Y, He Y, et al. High repetition rate sub-nanosecond dual-wavelength solid-state laser for airborne lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 082804.
- [5] 刘群, 刘崇, 朱小磊, 等. 星载海洋激光雷达最佳工作波长分析[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 148-155.  
Liu Q, Liu C, Zhu X L, et al. Analysis of the optimal operating wavelength of spaceborne oceanic lidar[J]. Chinese Optics, 2020, 13(1): 148-155.
- [6] Li K P, He Y, Ma J, et al. A dual-wavelength ocean lidar for vertical profiling of oceanic backscatter and attenuation[J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2844.
- [7] Lee D, Moulton P F. Compact OPO-based RGB source[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4294: 60-66.
- [8] Engin D, Fouron J L, Chen Y M, et al. Novel fiber-MOPA-based high power blue laser[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8381: 249-256.
- [9] Honea E, Savage-Leuchs M, Bowers M S, et al. Pulsed blue laser source based on frequency quadrupling of a thulium fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8601: 109-114.
- [10] Deyra L, Martial I, Didierjean J, et al. 3 W, 300  $\mu$ J, 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.
- [11] Van Leeuwen R, Chen T, Watkins L, et al. 1 W frequency-doubled VCSEL-pumped blue laser with high pulse energy[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9342: 149-155.
- [12] Creeden D, Blanchard J, Pretorius H, et al. 486 nm blue laser operating at 500 kHz pulse repetition frequency[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9728: 400-406.
- [13] Rong S K, Zhu X L, Chen W B. All-solid-state narrow-linewidth 455-nm blue laser based on Ti: sapphire crystal[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(1): 43-45.
- [14] Yu Y J, Jin G Y, Wang C, et al. High-power Nd: YAP blue laser by intracavity summing frequency[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7382: 73820F.
- [15] Chen F, Yu X, Yan R P, et al. High-repetition-rate, high-peak-power, linear-polarized 473 nm Nd: YAG/BiBO blue laser by extracavity frequency doubling[J]. Optics Letters, 2010, 35(16): 2714-2716.
- [16] Chen F, Yu X, Zhang K, et al. Diode-pumped acousto-optical Q-switched 912 nm Nd: GdVO<sub>4</sub> laser and extracavity frequency-doubling of 456 nm deep-blue light emission[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 68: 36-40.
- [17] Lu T T, Ma J, Zhu X L, et al. Highly efficient electro-optically Q-switched 473 nm blue laser[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(5): 051405.
- [18] 李凯鹏, 贺岩, 侯春鹤, 等. 双波长海洋激光雷达探测近岸到大洋水体的叶绿素剖面[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2010002.  
Li K P, He Y, Hou C H, et al. Detection of chlorophyll profiles from coastal to oceanic water by dual-wavelength ocean lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2010002.

## 约稿专家简介:



朱小磊(1966—), 博士, 研究员/博士生导师。1983年考入浙江大学光学仪器工程学系激光技术及仪器专业学习, 1987年7月本科毕业获学士学位; 之后分配到中国科学院上海光学精密机械研究所工作; 1998—2001年于香港中文大学物理系攻读博士学位, 2001年7月毕业并获得博士学位。现任中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息技术研究中心主任。2021年12月起, 担任上海市激光学会理事长。长期从事激光技术与应用系统研究工作, 主要研究方向包括全固态激光器技术、非线性频率转换技术和蓝绿激光海洋探测与信息传输技术等。荣获上海市技术发明奖一等奖1项(3/15)、上海市科学技术普及奖一等奖1项(10/15)。E-mail: [xlzhu@siom.ac.cn](mailto:xlzhu@siom.ac.cn)。