

准相位匹配 PPMgLN 腔内倍频绿激光器研究进展

林洪沂*, 吴铭钰, 孙栋, 唐杰, 阮剑剑

厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建 厦门 361024

摘要 结构紧凑、效率高、性能稳定的绿激光器在光存储、激光打印、舞台表演、医疗、水下通信等领域, 尤其是激光显示领域具有广泛应用。由于缺乏相应输出波长的高效半导体绿激光器, 基于倍频技术的全固态激光器仍然是产生绿色激光最有效的方法。近年来, 随着周期性极化技术的成熟, 准相位匹配 PPMgLN 倍频绿激光器发展迅猛。本文综述了 PPMgLN 腔内倍频绿激光器的结构、性能优势及发展现状。

关键词 激光器; 绿激光器; 准相位匹配; PPMgLN 晶体; 532 nm 激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.190004

Research Progress of Green Lasers Based on Quasi-Phase-Matched Intracavity Frequency Doubling in PPMgLN

Lin Hongyi*, Wu Mingyu, Sun Dong, Tang Jie, Ruan Jianjian

School of Optoelectronic and Communication Engineering, Xiamen University of Technology,

Xiamen, Fujian 361024, China

Abstract Green lasers having a compact structure, high efficiency, and stable performance are widely used in optical storage, laser printing, stage performance, medical treatment, and underwater communication, particularly in laser displays. All-solid-state lasers based on frequency doubling technology are currently the most effective means of generating green lasers because of the lack of efficient semiconductor lasers having the corresponding output spectrum. With the developed technology of a periodically poled crystal, green lasers based on quasi-phase-matched intracavity frequency doubling in PPMgLN have been rapidly developed in recent years. Hence, this study reviews the multiple structures, performance advantages, and development status of green lasers based on PPMgLN.

Key words lasers; green laser; quasi-phase matching; PPMgLN crystal; 532 nm laser

OCIS codes 140.3515; 140.3530; 140.7300

1 引言

中小功率全固态绿激光器具有结构紧凑、光束质量好、效率高、寿命长、性能稳定可靠的优点, 在光存储、激光打印、舞台表演、医疗、水下通信等领域, 尤其是激光显示领域具有广泛应用。相比于 LED 显示和液晶显示等, 激光显示技术具有色域覆盖率高、寿命长、亮度高等优势, 被视为下一代显示技术发展的焦点和主流, 具有广阔的应用前景。目前, 在

用于激光显示的三基色光源中, 红、蓝光半导体激光工艺已经成熟, 而绿光半导体激光器由于半导体材料和制备工艺的限制, 存在效率低、稳定性差、技术门槛高以及难以量产的问题^[1]。因此, 倍频技术仍然是产生绿色激光的最有效方法之一^[2-3]。

近几年, 准相位匹配周期性极化晶体的出现极大地推动了倍频技术的发展, 准相位匹配可以充分利用晶体最大非线性系数消除走离效应, 降低倍频阈值, 提高绿光输出功率和转换效率。目前, 常用的周期性

收稿日期: 2019-03-20; 修回日期: 2019-04-10; 录用日期: 2019-04-17

基金项目: 福建省自然科学基金(2018I0019)、福建省教育厅中青年教师教育科技项目(JT180433)、厦门科技局项目(3502Z20183062)

* E-mail: linyi0714@163.com

极化晶体有 PPLN、PPLT、PPKTP、PPMgLN 等^[4-5]。相比于 PPLN、PPKTP, PPMgLN 具有更大的抗光损伤阈值, 室温下即可实现高效倍频激光输出。

与常用角度相位匹配的 KTP、LBO 相比, 准相位匹配 PPMgLN 具有巨大优势。KTP 的非线性系数较大(3.2 pm/V), 但是为了避免灰痕效应, 它只能用于小功率激光器, 且 KTP 倍频绿光的偏振会随温度发生变化, 在对偏振严格的领域受到了一定限制; LBO 抗光损伤阈值高, 偏振输出效果好, 但非线性系数较小(0.96 pm/V), 通常需要增加长度(>5 mm)来提高效率, 这就限制了激光器的小型化, 且存在生长周期长、价格高、走离角大(7 mrad)的缺点。

PPMgLN 高非线性系数(16~22 pm/V)的特性, 降低了对基频光功率的要求, 提高了转换效率。高非线性系数为激光器设计提供了很大的灵活性, 即在不牺牲输出功率的条件下, 可以通过减小晶体长度来提高角度和温度接受带宽, 进而提高系统的稳定性。因为腔内倍频的产生受限于最大基频光功率, 当基频光功率达到某一数值后, 即使增加 PPMgLN 的长度, 也不能提高转换效率。因此, 在腔内倍频结构中, 可以通过减小 PPMgLN 晶体的长度, 提高激光器的性价比和输出参数。

2 腔内倍频 PPMgLN 绿激光器

腔外倍频结构具有结构简单、偏振输出好、输出稳定的特点, 但基频光与 PPMgLN 晶体相互独立, 使得整个系统复杂、成本较高; 而且为了保证转换效率, 非线性晶体的长度一般比较长。因此, 为了兼顾转换效率和紧凑性, 目前大部分倍频技术采用腔内倍频结构。腔内倍频具有以下优点: 1) 腔内基频光功率高, 对基频光光束质量的要求低, 可以采用激光二极管(LD)近贴抽运模式; 2) 腔内结构更紧凑, 易于小型化, 甚至可以模块化、集成化; 3) 腔内结构降低了对 PPMgLN 长度的要求, 准相位匹配的温度接受带宽更大, 更有利于温控。

2.1 半导体激光器腔内倍频

成熟的近红外半导体激光工艺与腔内倍频相结合的技术是产生绿色激光的一个有效途径, 常见的半导体激光器有电抽运和光抽运两种(表 1)。与全固态激光器相比, 采用电抽运垂直外腔面发射半导体激光器(VECSEL)直接腔内倍频减少了 LD 抽运 Nd:YVO₄ 激光晶体的过程, 因此结构更紧凑, 性能更稳定, 适合大规模生产。2004 年, 美国 Novalux 公司采用电抽运 GaAs-VECSEL 产生了波长为 1064 nm 的基

频光, 通过 PPLN 腔内倍频获得了 30 mW 基横模单频 532 nm 激光输出^[6]; 2009—2010 年, 英国 Glamorgan 大学报道了电抽运 VECSEL 腔内倍频 534.7 nm 激光器, 输出功率为 1.31 W, 电效率为 1.5%^[7-8], 如图 1 所示; 2014 年, 美国 Princeton Optronics 公司报道了电抽运 InGaAs/GaAs 多量子阱增益结构 VECSEL 腔内倍频 531 nm 激光器^[9], 采用耦合透镜调整基频光的光斑大小, 采用布氏片提高偏振特性, 采用法布里-珀罗(F-P)标准具压缩基频光的线宽, 其输出功率可达到 4.74 W, 电-光转换效率为 18.3%; 2015 年, Zhao 等^[10]通过优化外谐振腔的结构, 增加有源区尺寸(由 400 μm 增加到 450 μm), 在不增加红外光光斑尺寸的情况下, 获得了更高的基频光功率, 即提高了基频光的光功率密度, 电-光转换效率达到了 21.2%; 2011 年, OSRAM 公司提出了一种新的 VECSEL 芯片设计方案, 即将外延层转移到硅载体上, 在晶圆级上进行加工, 从而显著降低热阻, 提高最大输出功率^[11], 功率为 150 mW, 电-光转换效率为 18%。

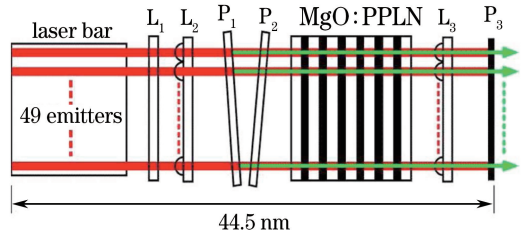


图 1 电抽运垂直外腔面发射半导体激光器的腔内倍频 534.7 nm 激光器^[7]

Fig. 1 Intracavity frequency doubling 534.7 nm laser based on electrically pumped vertical external-cavity surface-emitting semiconductor laser^[7]

2008 年, 德国 OSRAM 公司采用光抽运半导体(OPS)盘式激光器产生波长为 1060 nm 的基频光, 通过 PPMgLN 腔内倍频获得了 80 mW 单频 530 nm 绿色激光输出^[12], 发散角 < 10 mrad, 光斑直径为 100 μm, 电-光转换效率为 7%, 体积仅为 13 mm × 6.5 mm × 4.8 mm, 如图 2 所示。由于谐振腔的腔长和 OPS 半导体的上能级寿命均较短, 该激光器没有出现严重噪声和跳模现象。半导体盘式激光器具有功率高、光束质量好、光斑尺寸小、调制特性和稳定性良好的特点, 可以用于扫描投影成像系统, 但该平台仍然需要传统的光抽运源、盘式半导体增益介质和复杂的谐振腔结构, 在大规模生产过程中遇到了障碍。

2.2 全固态激光器腔内倍频

Nd:YVO₄ 晶体是目前性能最优的激光增益介质之一, 具有以下优点: 1) 在 808 nm 波段吸收系

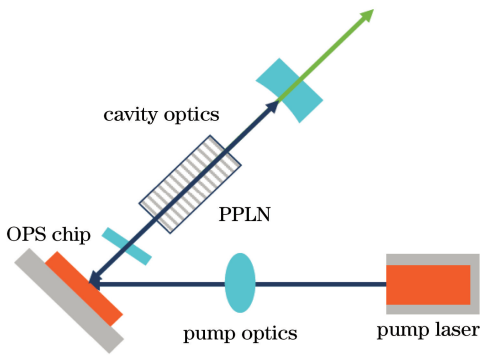


图2 光抽运半导体盘式激光器的腔内倍频 530 nm 绿激光器^[11]

Fig. 2 Intracavity frequency doubling 530 nm green laser based on optically pumped semiconductor chip laser^[11]

数大,可以吸收大量的抽运光,易于实现绿色激光器小型化;2) 吸收带宽约为 Nd : YAG 晶体的 5 倍,降低了对温控的要求,可以根据 PPMgLN 的温度带宽对 LD 与 PPMgLN 整体控温;3) Nd : YVO₄ 为单轴晶体,输出的 1064 nm 基频光为线偏振光,腔内不需要添加任何偏振器件,可以提高倍频效率。

2.2.1 普通全固态激光器腔内倍频(单点抽运结构)

国内外均有大量关于全固态激光器的 PPMgLN 腔内倍频实验的报道^[13-27]。该激光器采用 Nd : YVO₄ 作为激光工作物质,光-光转换效率

表 1 半导体激光器腔内倍频的输出参数(OO 为光-光转换效率;EO 为电-光转换效率)

Table 1 Output parameters of intracavity frequency doubled semiconductor lasers (OO: optical-to-optical conversion efficiency; EO: electro-optical conversion efficiency)

| Year | Research institute | LD cavity | Gain medium | PPMgLN | Output parameters |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 2004 ^[6] | Novalux, USA | Electrically pumped VECSEL | GaAs | PPLN | 30 mW, single-frequency, $M^2 < 1.2$, stability 0.5% |
| 2009 ^[7] | University of Glamorgan, UK | Electrically pumped VECSEL A 49-edge-emitter laser bar | Oclaro | 10 mm, 6.92 μ m | 534.7 nm, 1.31 W, EO 1.5%, OO 3.1% |
| 2010 ^[8] | University of Glamorgan, UK | Electrically pumped VECSEL A 49-edge-emitter laser bar | Oclaro | 10 mm, 6.92 μ m | 534.2 nm, 1.2 W, temperature bandwidth 1 °C |
| 2014 ^[9] | Princeton Optronics, Inc., USA | Electrically pumped VECSEL | InGaAs/ GaAs | 7 mm, 6.94 μ m | 531 nm, 4.74 W, EO 18.3%, $M^2 \approx 13$, stability $\pm 1.4\%$ |
| 2015 ^[10] | Princeton Optronics, Inc., USA | Electrically pumped VECSEL | InGaAs/ GaAs | 7 mm, 6.94 μ m | 532 nm, 3.34 W, EO 21.2%, $M^2 \approx 13$ |
| 2011 ^[11] | OSRAM, Germany | Optically pumped VECSEL | VECSEL chip | 1 mm | 530 nm, 150 mW, 5-10 mrad, EO 18%, $M^2 \approx 1$, single-frequency |
| 2008 ^[12] | OSRAM, Germany | Optically pumped semiconductor disk lasers | OPS chip | 1.2 mm | 530 nm, 80 mW, <10 mrad, EO 7%, $M^2 \approx 1$, single-frequency |

可以达到 30% 以上^[13-22,24-25,27]。2008 年,日本 Matsushita 电子公司报道了一款体积仅为 3 cm³、无需制冷、可于常温下工作的绿激光器^[13](含抽运源),输出功率为 0.7 W,光-光转换效率为 30%,工作温度范围为 30 °C;经过优化(提高抽运功率和改善耦合系统),体积可减小到 2 cm³,输出功率达到 1.7 W,光-光转换效率为 39.2%,电-光效率达到 18.9%,工作温度范围为 46 °C,耗能为 7.3 W,无需制冷^[14],该激光器性能可靠、体积小、效率高,应用广泛;2010 年,中国科学院光电研究院报道了光-光转换效率高达 52%、输出功率为 1.56 W 的 PPMgLN 腔内倍频绿激光器^[17],如图 3 所示;2011 年,中国科学院光电研究院通过提高抽运光功率和优化耦合方式获得了紧凑高效的绿激光器,其光-光转换效率高达 56%^[21],该激光器封装后体积为 10 mm×15 mm×30 mm。

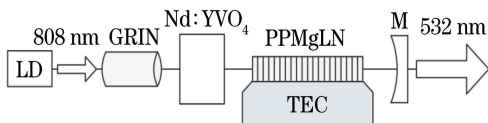
2014 年,山东大学采用 Nd : Mg : LiTaO₃ 作为激光工作物质,以 PPMgLN 腔内倍频(1092 nm 和 1076 nm)与和频(1092 nm 和 1076 nm)的方式获得了 546,542,538 nm 三波长的绿光输出,输出总功率为 62.8 mW^[26]。虽然光-光转换效率为 1.4%,但是采用三波长,有效降低了激光散斑现象。

在产生高功率的绿激光器中,大部分采用光纤或者自聚焦透镜耦合的 LD 作为抽运源,但对于激光投影仪来说,此类绿激光器体积大、价格较高。

表2 普通全固态激光器的腔内倍频输出参数

Table 2 Output parameters of intracavity frequency doubled all-solid-state lasers

| Year | Research institute | PPMgLN, gain crystal | Cavity | Output parameters |
|----------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 2008 ^[13] | Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Japan | 0.5 mm, 7 μm Nd : YVO ₄ | Straight | 0.7 W, OO 30%, EO 11.8%, operation temperature range 30 $^{\circ}\text{C}$ |
| 2008 ^[14] | Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Japan | 0.5 mm, 7 μm Nd : YVO ₄ | Straight | 1.7 W, OO 39.2%, EO 18.9%, operation temperature range 46 $^{\circ}\text{C}$ |
| 2008 ^[15] | Chinese Academy of Sciences | 10 mm Nd : YVO ₄ | Straight | 908 mW, OO 33.5%, stability 2.5%, temperature bandwidth $\approx 10^{\circ}\text{C}$ |
| 2009 ^[16] | Chinese Academy of Sciences | 3 mm, 6.9 μm Nd : YVO ₄ | V-shaped | 6.67 W, OO 33.35%, stability 3% |
| 2010 ^[17] | Chinese Academy of Sciences | 2 mm, 6.93 μm Nd : YVO ₄ | Straight | 1.56 W, OO 52%, temperature bandwidth 15 $^{\circ}\text{C}$ |
| | | 1 mm, 6.93 μm Nd : YVO ₄ | Straight | 1.52 W, OO 50.7%, temperature bandwidth 12 $^{\circ}\text{C}$ |
| 2011 ^[18] | Qingdao University | 12 mm, 6.95 μm Nd : YVO ₄ | Straight | 1.2 W, OO 30%, peak power 910 W |
| 2011 ^[19] | McMaster University, Canada | 2 mm, 7 μm Nd : YVO ₄ | Straight | 1.02 W, OO 37.2%, stability 4% |
| 2011 ^[20] | McMaster University, Canada | 1 mm Nd : YVO ₄ | Straight | 1.1 W, OO 37.3%, EO >19%, 1.2 temperature tolerance > 30 $^{\circ}\text{C}$ |
| 2011 ^[21] | Chinese Academy of Sciences | 1 mm, 6.95 μm Nd : YVO ₄ | Straight | 3.8 W, OO 56%, stability 2.5% |
| 2012 ^[22] | Xiamen University | 2.5 mm, 7 μm Nd : YVO ₄ | Straight | 6.2 W, OO 43%, stability 5% |
| 2012 ^[23] | Nanjing University | 4.8 mm, 6.76 μm Nd : GdVO ₄ | Z-shaped | 531.5 nm, 2.4 W, OO 16%, stability 5%, temperature bandwidth 7 $^{\circ}\text{C}$ |
| 2014 ^[24] | Chinese Academy of Sciences | 1 mm, 6.96 μm Nd : YVO ₄ | Straight | 1.84 W, OO 51%, stability 1% |
| 2014 ^[25] | Chinese Academy of Sciences | 2 mm, 6.96 μm Nd : YVO ₄ | Straight | 5.6 W, OO 51%, stability 5%, temperature bandwidth 12 $^{\circ}\text{C}$ |
| 2014 ^[26] | Shandong University | 2 mm, 7.55 μm , Nd : Mg : LiTaO ₃ | V-shaped | 546 nm, 102 mW, OO 2.3% |
| | | 7.55, 7.38, 7.22 μm and 2 mm, Nd : Mg : LiTaO ₃ | V-shaped | 546, 542, 538 nm, 62.8 mW, OO 1.4% |
| 2015 ^[27] | Nanjing University of Information Science & Technology | PPLN, 1.3 mm, 7 μm Nd : YVO ₄ | Straight | 1.343 W, OO 32.8%, stability 2% |
| 2018 ^[28] | Shandong Normal University | 5 mm, 6.92 μm Yb : LYSO | Z-shaped | 529 nm, 90 mW, stability 5% |

图3 全固态腔内倍频绿激光器示意图^[15,17]Fig. 3 Diagram of all-solid-state intracavity frequency doubled green laser^[15,17]

2.2.2 多点LD抽运结构

在激光显示高速发展的今天,激光散斑问题急需解决,而降低激光空间相干性是消除散斑的

一个非常有效的方法。上述单点绿激光器的相干性很强,需要采取诸如旋转随机相位片、振动光纤、动态屏幕等措施来减小散斑。2008年,日本Mitsubishi电子公司提出了一种多点列阵LD抽运的PPMgLN腔内倍频绿激光器的结构,如图4所示,其采用15个发光点LD作为抽运源,产生线形光斑,15个LD相互独立,可以有效减小绿色激光的空间相干性^[29]。

如表3所示,多发光点LD列阵抽运与单光点LD抽运相比,具有以下优点:1)抽运光分布面积

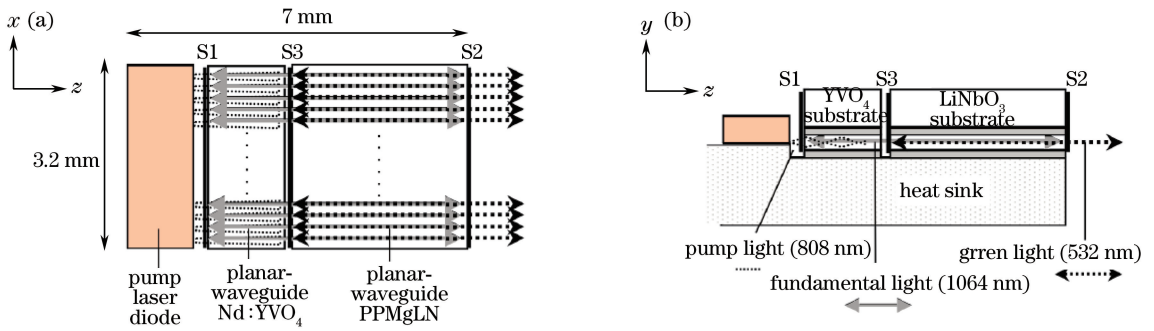


图 4 多发光点抽运的列阵型绿激光器示意图^[29]。(a)列阵型绿激光器上视图;(b)列阵型绿激光器侧视图

Fig. 4 Diagrams of array green laser pumped by multiple luminous points^[29]. (a) Top view of array green laser; (b) side view of array green laser

较大,LD列阵和 PPMgLN 温控更容易;2)产生更有效的抽运耦合和基频光振荡;3)横模间小的非线性耦合可以使输出功率稳定、噪声低;4)线形光斑在短轴方向的发散角接近衍射极限,在长轴方

向具有较差的空间相干性(多个 LD 发光点相互独立),可以消除散斑;5)利用热效应和光波导结构,谐振腔便于调节;6)激光功率密度较低,使用寿命更长^[29-32]。

表 3 多点 LD 列阵抽运结构 Nd : YVO₄/PPMgLN 激光器的输出参数

Table 3 Output parameters of Nd : YVO₄/PPMgLN laser pumped by multi-point LD array

| Year | Research institute | LD | PPMgLN | Output parameters |
|----------------------|----------------------------------------|---------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 2008 ^[29] | Mitsubishi Electric Corporation, Japan | 15 arrayed LD | Planar-waveguide 4 mm | Average power 7.6 W, peak power 10.9 W, OO 40%, EO 20% CW 10.8 W, |
| 2009 ^[30] | Mitsubishi Electric Corporation, Japan | 15 arrayed LD | Planar-waveguide 4 mm | OO 40%, EO 20% pulse: peak power 11.4 W, average power 3.8 W, OO 42% |
| 2009 ^[31] | Mitsubishi Electric Corporation, Japan | 15 arrayed LD | Planar-waveguide 4 mm | CW 10.8 W, OO 40%, EO 20%, temperature bandwidth 40 °C |
| 2016 ^[32] | Chinese Academy of Sciences | 19 arrayed LD | 2 mm, 6.95 μm | 3.12 W, OO 9.2% |

2009 年,Mitsubishi 电子公司采用 15 个发光点 LD 列阵、PPMgLN 光波导晶体,获得了 10.8 W 绿光输出,光-光转换效率达到 40%,电-光转换效率高达 20%^[30];2016 年,中国科学院光电研究院采用 19 个发光点 LD 阵列作为抽运源,获得了 3.12 W 连续绿光输出,但光-光转换效率仅为 9.2%^[32]。

2.3 模组结构

从输出功率和效率角度考虑,上述腔内倍频结构是产生绿光非常有效的办法;但从价格和体积角度考虑,商用激光显示(尤其是微型激光投影仪)的绿激光器价格高、体积大。微型投影仪对光源的严苛要求推动了绿色激光模块化发展,目前的模组主要有键合、光胶合和 M-green 3 种结构,如表 4 所示。

2.3.1 键合结构

2009—2011 年,美国 Spectralus 公司推出的微晶片绿光模组将 Nd : YVO₄ 和 PPMgLN 晶体(小于 2 mm)通过化学键合的方法结为一体,如图 5 所

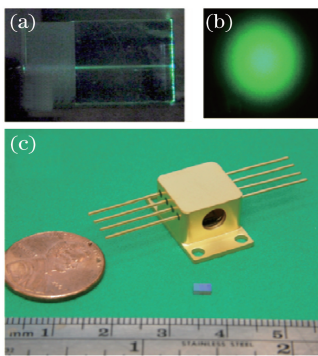
示,该键合晶体可以直接用商用 LD 抽运,无需透镜耦合,平均输出功率可达 250 mW,4500 h 内功率稳定性为 5%,光-光转换效率为 30%,电-光转换效率 > 10%,工作温度范围为 40 °C,光束质量很好^[33-36]。该模块封装后体积非常小,带有内置光电二极管功率自动反馈装置的 ATTO 模块体积仅为 0.33 cm³,普通绿激光器 ATTO-K 体积为 0.23 cm³。对于消费性电子市场应用(如微型、移动投影仪)来说,该型紧凑高效的绿激光器具有很大的应用潜力。

2.3.2 光胶合结构

2010 年,加拿大 McMaser University 报道的光胶合 Nd : YVO₄/PPMgLN 模组将长为 0.5 mm、原子数分数为 3% 的高掺杂 Nd : YVO₄ 晶体和长为 1 mm 的 7 μm 周期 PPMgLN 晶体胶合在一起,高掺杂确保了抽运光的良好吸收,短极化晶体保证了较宽的温度接受带宽。抽运峰值电流为 1.44 A 时,

表4 Nd:YVO₄/PPMgLN 模组激光器的输出参数Table 4 Output parameters of green lasers with Nd:YVO₄/PPMgLN modules

| Year | Research institute | Module | Output parameters |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------|
| 2009—2011 ^[33-36] | Spectralus Corporation, USA | Monolithic cavity | 250 mW, stability 5%, OO 30%, EO >10% |
| 2010 ^[37] | McMaser University, Canada | Optical-contact | Average power 450 mW, peak power 541.5 mW, OO 33.5%, EO 16.25% |
| 2013 ^[38] | Chinese Academy of Sciences | Optical-contact | 295 mW, OO 25.5%, stability 2.5% |
| 2016 ^[39] | Yunnan Normal University | Optical-contact | 2 arrayed LD, 200 mW, OO 21.7% |
| 2017 ^[40] | Chinese Academy of Sciences | Optical-contact | 3 arrayed LD, 223.7 mW, stability ±2.5% |
| 2012 ^[41] | McMaser University, Canada | M-green | 1.02 W (4 W 808 pump), OO 25.5% |
| 2012 ^[42] | McMaser University, Canada | M-green | 1.15 W (3 W 808 pump), OO 38.5% |
| 2013 ^[43] | McMaser University, Canada | M-green | 6-beam array, 6.47 W, OO 29.9% |
| 2013 ^[44] | McMaser University, Canada | M-green | 1.28 W (4.4 W 808 pump), OO 29.1% |
| 2018 ^[45] | McMaser University, Canada | M-green | 2.9 W, OO >40% |

图5 Spectralus 微晶片绿光模组^[35]。(a) Nd:YVO₄和 PPMgLN 键合晶体；(b)输出光斑；(c)绿激光器模组Fig. 5 Green module of Spectralus microship^[35].(a) Nd:YVO₄/PPMgLN bonding crystal;

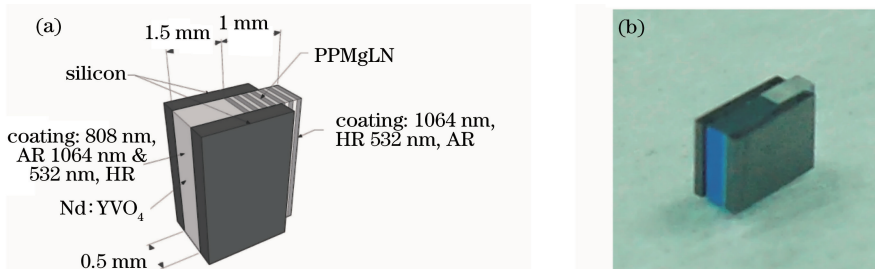
(b) output light spot; (c) green laser package

获得了平均功率为 450 mW 绿光输出,电-光转换效率高达 16.25%^[37]。2013 年,周煌等^[38]采用长度为 1.5 mm、原子数分数为 1.5%的掺杂 Nd:YVO₄与长 1 mm 的 PPMgLN 光胶合晶体,获得了 295 mW 绿光输出,光-光转换效率为 25.5%,稳定度为 2.5%,如图 6 所示。2016 年,鲁国志等^[39]采用 922 mW 的 LD 抽运,获得了 200 mW 单频绿光输

出,光-光转换效率为 21.7%。2017 年,刘玉良等^[40]获得了 223.7 mW 绿光输出,稳定性为 ±2.5%。

2.3.3 M-green 结构

对于键合或胶合 Nd:YVO₄/PPMgLN 模组,两个晶体具有不同的热膨胀系数,当功率较小时,热膨胀效应不明显,Nd:YVO₄/PPMgLN 模组具有良好的工作特性;当功率较大时,Nd:YVO₄晶体吸收的 40%~50%抽运能量转换成热量,热量传导给 PPMgLN,过多的热量会引起 Nd:YVO₄与 PPMgLN 不同程度的热膨胀,造成键合或胶合晶体裂开,谐振腔平行度遭到破坏,导致激光器不能正常工作。另外,多余的热量会影响准相位匹配,降低系统转换效率,因此键合或胶合晶体不利于较大功率(>500 mW)输出。针对该问题,2012 年,加拿大 McMaser University 的 Gan 等^[41]报道了一种新颖的绿光模组 M-green,即将镀膜的 Nd:YVO₄(原子数分数为 3%高掺杂)和 PPMgLN(长度为 1.0~1.5 mm)分别固定在同一硅片上,两晶体隔开一段距离,构成平平腔结构,如图 7 所示。封装后模块体积为 7~10 mm(长)×4.5 mm(宽)×2 mm(厚),Nd:YVO₄和 PPMgLN 分离放置,热膨胀系数对

图6 光胶合绿光模组的示意图和实物图^[38]。(a)光胶合绿光模组示意图；(b)光胶合绿光模组实物图Fig. 6 Schematic and physical drawings of optical-contact green module^[38]. (a) Schematic drawing of optical-contact green module; (b) physical drawing of optical-contact green module

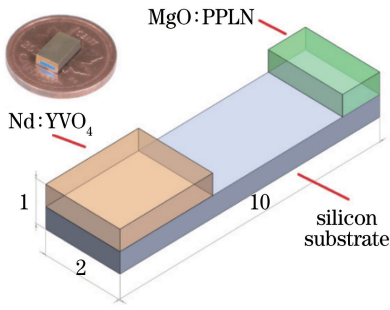


图 7 M-green 示意图与实物图^[41]

Fig. 7 Schematic and physical drawings of M-green module^[41]

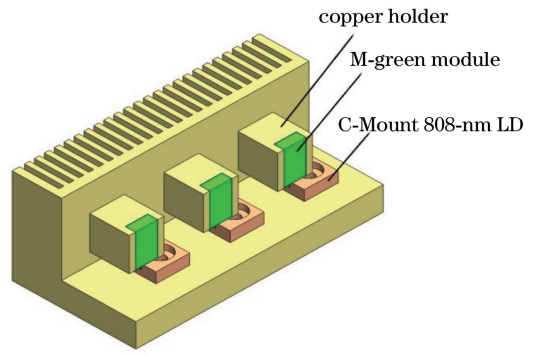


图 8 多束 M-green 激光器模组示意图^[43]

Fig. 8 Diagram of multi-beam M-green laser^[43]

谐振腔的影响不大,且相位失配较小。采用 808 nm 的 LD 近贴抽运可以获得 $>1\text{ W}$ ($1.02^{[41]}$, $1.15^{[42]}$, $1.28^{[44]}$, $2.9\text{ W}^{[45]}$) 的绿光输出,最大的光-光转换效率为 38.5%。相对于键合或胶合晶体, M-green 结构的功率和效率更高,性能更稳定。

绿光模组可以采用多个 LD 分别抽运产生多束绿光,然后通过光学办法耦合(反射镜、偏振耦合、光纤耦合等)在一起,进而提高总功率^[43],如图 8 所示。该结构中多个发光束距离较远且相互独立,散热效果更好,性能更稳定,多光束间没有相干关系,有效减少了激光散斑,可以应用于舞台表演、绿光照明、激光投影和激光电视等领域。

2.4 脉冲腔内倍频结构

调 Q 和锁模技术是最常用的全固态激光产生

脉冲输出方法,高峰值功率、窄脉宽绿光在激光通信、测距、生物医疗、非线性光学、抽运氦离子激光器等领域具有重要应用。Cr: YAG、半导体饱和吸收镜、GaAs 半导体以及近年来快速发展的纳米材料(碳纳米管、石墨烯、氧化石墨烯、二维 MoS_2 、 WS_2 、黑磷)在基频光 $1\ \mu\text{m}$ 波段处都具有良好的饱和吸收特性,可以满足被动调 Q 和锁模技术的要求^[46-50]。结合脉冲激光器和 PPMgLN,采用腔内倍频,可以产生脉冲绿激光输出,如表 5 所示。在被动调 Q 实验中,与常用的 Cr: YAG 饱和吸收体相比,采用纳米材料饱和吸收体的激光器脉冲较宽,峰值功率较低^[46-48];在被动锁模实验中,绿光的输出功率为 757 mW,脉宽为 3.5 ps,峰值功率达 2.49 kW,明显优于被动调 Q^[49]。

表 5 脉冲绿激光器的输出参数

Table 5 Output parameters of pulsed green lasers

| Year | Research institute | PPLN | Pulse mode | Average output power | Pulse width | Repetition Rate | Peak power |
|----------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------|-------------|-----------------|------------|
| 2011 ^[46] | Qingdao University | 12 mm, 6.95 μm | Cr: YAG, Q-switched | 765 mW | 12 ns | 70 kHz | 910 W |
| 2017 ^[47] | Nanjing University of Information Science & Technology | 1.2 mm | MoS_2 , Q-switched | 323 mW | 320 ns | 66.7 kHz | 15 W |
| 2018 ^[48] | Nanjing University of Information Science & Technology | 1.3 mm, 7 μm | Graphene oxide, Q-switched | 536 mW | 98 ns | 71.4 kHz | 76.6 W |
| 2018 ^[49] | Nanjing University of Information Science & Technology | 1.2 mm, 7 μm | MoS_2 , mode-locked | 757 mW | 3.5ps | 87.2 MHz | 2.49 kW |

3 PPMgLN 绿激光器发展趋势

作为一种高效的非线性光学频率变换技术,腔内倍频具有巨大的发展潜力,是目前产生绿激光的主要手段。展望未来,腔内倍频技术的发展主要集中在以下几个方面。

(1) 性能优良的 PPMgLN 晶体的制作

目前,短周期性($\approx 7\ \mu\text{m}$)极化技术尚未完全成

熟,PPMgLN 的厚度通常仅为 0.5~1 mm,从而限制了 PPMgLN 晶体在大功率倍频激光器中的使用。因此,如何有效降低矫顽电场强度,提高光学均匀性,制作大尺寸、大通光孔径的 PPMgLN 晶体,进而使该类材料商品化、广泛化,将会是该技术发展的方向;光波导晶体可以有效约束基频光,提高基频光功率密度,进而提高倍频转换效率,波导晶体(激光晶体或者 PPMgLN)的使用还可以提高谐振腔的

稳定性,使绿光的输出更加稳定可靠,封装更加简单;另外,Nd³⁺和MgO共掺杂PPLN,即Nd:Mg:PPLN晶体,将激光增益介质和倍频晶体合二为一,实现了腔内自倍频,该结构在体积和封装方面具有巨大优势,将来也会得到发展^[51]。

(2) PPMgLN绿激光器的进一步发展

制作结构简单紧凑、性能稳定可靠、功率大、体积小、效率高、价格便宜,甚至可调谐、高峰值功率、窄线宽输出的全固态绿激光器,永远是该领域科技工作者不断追求的方向。

(3) 与半导体激光器的结合

可以结合PPMgLN腔内倍频与成熟的半导体激光技术制作高性能的绿激光器,尤其是可以利用近几年发展迅速的垂直腔面发射半导体激光器。垂直腔面发射半导体激光器具有线宽窄、光束质量好、可靠性高和制造成本低等优点,比光抽运半导体盘式激光器、分布反馈式布拉格半导体激光器、分布反射式布拉格半导体激光器更有优势。

(4) 模块化发展及集成

高功率小体积模组、采用光波导晶体的模组、多束绿激光的合成,在激光投影、舞台表演、激光电视等方面具有广阔的应用前景。

4 结束语

全固态激光技术是我国为数不多的、从激光材料(激光晶体、非线性晶体)到系统集成(中小功率激光器)都在国际上占有整体优势的高技术领域;尤其是,我国在倍频、和频、差频、光参量振荡、拉曼散射等非线性频率变换技术领域的研究也一直处于世界前列。本文综述了PPMgLN腔内倍频绿激光器的结构、性能优势及发展现状。

参 考 文 献

- [1] Chen Y H, Lin W C, Chen H Z, *et al.* Probing longitudinal modes evolution of a InGaN green laser diode[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 102: 222-226.
- [2] Zong Q S, Bo Y, Guo C, *et al.* High brightness narrow-linewidth microsecond pulse green laser by frequency doubling of a master oscillator power amplifier Nd : YAG laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 106: 294-298.
- [3] Jensen O B, Hansen A K, Müller A, *et al.* Efficient generation of 3.5 W laser light at 515 nm by frequency doubling a single-frequency high power

DBR tapered diode laser [J]. *Optics Communications*, 2017, 392: 167-170.

- [4] Lin H Y, Liu X, Sun D, *et al.* Continuous-wave eye-safe Nd : YVO₄/PPMgLN intra-cavity optical parametric oscillator with shared resonator [J]. *Optik*, 2017, 138: 127-129.
- [5] Xing T L, Wang L, Hu S W, *et al.* Widely tunable and narrow-bandwidth pulsed mid-IR PPMgLN-OPO by self-seeding dual etalon-coupled cavities [J]. *Optics Express*, 2017, 25(25): 31810-31815.
- [6] Shchegrov A V, Umbrasas A, Watson J P, *et al.* 532-nm laser sources based on intracavity frequency doubling of extended-cavity surface-emitting diode lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5332: 151-156.
- [7] Li K, Yao A Y, Copner N J, *et al.* Compact 1.3 W green laser by intracavity frequency doubling of a multi-edge-emitter laser bar using a MgO : PPLN crystal [J]. *Optics Letters*, 2009, 34 (22): 3472-3474.
- [8] Li K, Copner N J, Gawith C B E, *et al.* 532 nm laser sources based on intracavity frequency doubling of multi-edge-emitting diode lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7578: 757812.
- [9] Zhao P, Xu B, van Leeuwen R, *et al.* Compact 4.7 W, 18.3% wall-plug efficiency green laser based on an electrically pumped VECSEL using intracavity frequency doubling [J]. *Optics Letters*, 2014, 39 (16): 4766-4768.
- [10] Zhao P, Xu B, Leeuwen R V, *et al.* 21.2% wall-plug efficiency green laser based on an electrically pumped VECSEL through intracavity second harmonic generation [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9349: 93490M.
- [11] Lindberg H, Illek S, Pietzonka I, *et al.* Recent advances in VECSELs for laser projection applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7919: 79190D.
- [12] Steegmüller U, Kühnelt M, Unold H, *et al.* Green laser modules to fit laser projection out of your pocket [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6871: 687117.
- [13] Yokoyama T, Mizuuchi K, Nakayama K, *et al.* Compact intracavity green light source with wide operation temperature range using periodically poled Mg : LiNbO₃ [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(8): 6787-6789.
- [14] Yokoyama T, Nakayama K, Kurozuka A, *et al.* Compact and highly efficient intracavity SHG green light source with wide operation temperature range

- using periodically poled Mg : LiNbO₃ [J]. The Review of Laser Engineering, 2008, 36 (APLS): 1046-1048.
- [15] Chu S W, Zhang Y, Wang B, *et al.* High-efficiency intracavity continuous-wave green-light generation by quasiphase matching in a bulk periodically poled MgO : LiNbO₃ crystal [J]. Advances in OptoElectronics, 2008, 2008: 151487.
- [16] Qi Y, Yan B X, Chu S W, *et al.* High power green laser with PPMgLN intracavity doubled [C] // 2009 Conference on Lasers & Electro Optics & The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, August 30-September 3, 2009, Shanghai, China. New York: IEEE, 2009: 10950302.
- [17] Zhou M, Yan B X, Bao G, *et al.* 52% optical-to-optical conversion efficiency in a compact 1.5 W 532 nm second harmonic generation laser with intracavity periodically-poled MgO : LiNbO₃ [J]. Laser Physics, 2010, 20(7): 1568-1571.
- [18] Pan S D, Yuan Y, Zhao L N, *et al.* Compact passively Q-switched green laser with periodically poled MgO : LiNbO₃ [J]. Laser Physics, 2011, 21 (5): 887-890.
- [19] Gan Y, Xu Q Y, Lu Y, *et al.* Watt-level compact green laser for projection display [J]. Journal of the Society for Information Display, 2011, 19(11): 833-837.
- [20] Lu Y, Xu Q, Ma L, *et al.* PPLN chips for watt level low-cost efficient green lasers [C] // Proceedings of China Display/Asia Display. Kunshan: Southeast University Press, 2011: 215-216.
- [21] Yan B X, Bi Y, Wang D D, *et al.* Compact and highly efficient 3.8 W intracavity frequency-doubled Nd : YVO₄/PPMgLN green laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(3): 0302007.
颜博霞, 毕勇, 王栋栋, 等. 紧凑高效的 Nd : YVO₄/PPMgLN 腔内倍频 3.8 W 连续绿激光器 [J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302007.
- [22] Zheng X S, Ji B, Jia F Q, *et al.* A compact and high efficiency diode pumped green laser based on MgO doped PPLN [J]. Laser Physics, 2012, 22(1): 100-105.
- [23] Lu J, Liu Y H, Zhao G, *et al.* Generating a 2.4-W CW green laser by intra-cavity frequency doubling of a diode-pumped Nd : GdVO₄ laser with a MgO : PPLN crystal [J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29 (9): 094207.
- [24] Fei Q, Zou X L, Zhou H, *et al.* Compact and high-efficient intracavity frequency doubling solid-state TEM₀₀ green lasers by PPMgOLN crystal [J]. Applied Laser, 2014, 34(6): 598-601.
费穷, 邹小林, 周煌, 等. 基于 PPMgOLN 晶体的高效紧凑型的腔内倍频固体 TEM₀₀ 绿激光器 [J]. 应用激光, 2014, 34(6): 598-601.
- [25] Yan B X, Bi Y, Li S, *et al.* 5 W intracavity frequency-doubled green laser for laser projection [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9296: 92960M.
- [26] Wang D Z, Yan B X, Bi Y, *et al.* Three-wavelength green laser using intracavity frequency conversion of Nd : Mg : LiTaO₃ with a MgO : PPLN crystal [J]. Applied Physics B, 2014, 117(4): 1117-1121.
- [27] Gui S X, Chang J H, Yan N, *et al.* A compact and highly efficient intracavity frequency-doubled green laser based on periodically poled lithium niobate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(11): 1102002.
桂诗信, 常建华, 严娜, 等. 一种基于铌酸锂晶体的高效紧凑腔内倍频绿激光器 [J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1102002.
- [28] Zeng X, Tong L Y, Wang F H, *et al.* Yb : LYSO laser based on PPLN crystal by intracavity frequency doubling [J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science), 2018, 33(1): 69-72, 75.
曾鑫, 仝鲁阳, 王飞虎, 等. 基于 PPLN 晶体腔内倍频的 Yb : LYSO 连续激光器研究 [J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2018, 33(1): 69-72, 75.
- [29] Hirano Y, Yamamoto S, Koyata Y, *et al.* Highly efficient planar-waveguide green laser [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, May 4-9, 2008, San Jose, California, USA. Washington, D.C.: OSA, 2008: CPDA3.
- [30] Hirano Y, Yamamoto S, Akino Y, *et al.* High performance micro green laser for laser TV [C] // Advanced Solid-State Photonics, February 1-4, 2009, Denver, Colorado, USA. Washington, D.C.: OSA, 2009: WE1.
- [31] Hirano Y, Sasagawa T, Yanagisawa T, *et al.* Solid-state SHG green laser for laser TV [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, May 31-June 5, 2009, Baltimore, Maryland, USA. Washington, D.C.: OSA, 2009: PThA3.
- [32] Yan B X, Qi Y, Wang Y W. Compact intra-cavity frequency doubled line beam green laser by a laser diode array pumped [J]. Proceedings of SPIE, 2016,

- 10152: 1015217.
- [33] Khaydarov J, Shchegrov A, Essaian S, *et al.* 20.2: high-efficiency green laser source for compact projectors[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2009, 40(1): 265-267.
- [34] Khaydarov J, Shchegrov A, Essaian S, *et al.* High-efficiency green laser source for compact projectors [J]. Armenian Journal of Physics, 2009, 2(1): 55-59.
- [35] Khaydarov J, Essaian S, Nemet G, *et al.* Highly efficient and compact microchip green laser source for mobile projectors [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7582: 758202.
- [36] Khaydarov J, Essaian S, Shchegrov A, *et al.* Modulation and efficiency characteristics of miniature microchip green laser sources based on PPMgOLN nonlinear material [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7917: 791705.
- [37] Lu Y, Xu Q Y, Gan Y, *et al.* Field-sequential operation of laser diode pumped Nd : YVO₄/PPMgLN microchip green laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(13): 990-992.
- [38] Zhou H, Zou X L, Liang W G, *et al.* Intracavity frequency-doubled microchip laser based on PPMgOLN [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(s1): s114010.
周煌, 邹小林, 梁万国, 等. 基于 PPMgOLN 的内腔倍频微片激光器 [J]. 光学学报, 2013, 33(s1): s114010.
- [39] Lu G Z, Zhou H, Chen L Y, *et al.* Optical bond of Nd : YVO₄/PPMgOLN compact array microchip green laser [J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), 2016, 36(2): 54-58.
鲁国志, 周煌, 陈立元, 等. 小型光胶合 Nd : YVO₄/PPMgOLN 列阵微片绿激光器 [J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2016, 36(2): 54-58.
- [40] Liu Y L, Liang W G, Zhou H, *et al.* Compact 532 nm microchip laser array utilizing optical contact Nd : YVO₄/PPMgOLN [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(6): 0605003.
刘玉良, 梁万国, 周煌, 等. 基于 Nd : YVO₄/PPMgOLN 的 532 nm 紧凑型阵列激光器 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 0605003.
- [41] Gan Y, Lu Y, Xu Q Y, *et al.* 61.1: watt level compact green laser module for laser display [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2012, 43(1): 824-825.
- [42] Gan Y, Lu Y, Xu Q Y, *et al.* 38.5% optical-to-optical efficiency neodymium-doped yttrium vanadate/magnesium-oxide-doped periodically poled lithium niobate integrated green module with watt-level output power for laser display applications [J]. Optical Review, 2012, 19(6): 409-411.
- [43] Gan Y, Su H P, Lu Y, *et al.* 60.3: 6 watt multi-beam green laser for companion laser projectors [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2013, 44(1): 836-837.
- [44] Gan Y, Lu Y, Xu Q Y, *et al.* Compact integrated green laser module for watt-level display applications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(1): 75-77.
- [45] Zhang B, Gan Y, Xu C Q. Study of the field-sequential modulation of Nd : YVO₄/MgO : PPLN based intra-cavity frequency doubling green laser [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 102: 174-179.
- [46] Pan S D, Yuan Y, Zhao L N, *et al.* Compact passively Q-switched green laser with periodically poled MgO : LiNbO₃ [J]. Laser Physics, 2011, 21(5): 887-890.
- [47] Chang J H, Yang Z B, Li H H, *et al.* Passively Q-switched Nd : YVO₄/PPLN green laser with a few-layered MoS₂ saturable absorber [J]. Optical Review, 2017, 24(6): 765-771.
- [48] Chang J H, Li H H, Yang Z B, *et al.* Efficient and compact Q-switched green laser using graphene oxide as saturable absorber [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 98: 134-138.
- [49] Shi S H, Chang J H, Yang Z B, *et al.* Passively mode-locked Nd : YVO₄/PPLN green laser using molybdenum disulfide as a saturable absorber [J]. Optical Engineering, 2018, 57(9): 096110.
- [50] Lin H Y, Pan X, Huang Z C. A passively Q-switched 1087.2 nm c-cut Nd : YVO₄ laser with WS₂-based saturable absorber [J]. Optik, 2018, 158: 684-687.
- [51] Wang D Z, Sun D H, Kang X L, *et al.* Periodically poled self-frequency-doubling green laser fabricated from Nd : Mg : LiNbO₃ single crystal [J]. Optics Express, 2015, 23(14): 17727-17738.