

# 小型化微片阵列式被动调 Q 全固态激光器

王震<sup>1,2</sup>, 李立广<sup>3</sup>, 赵柏秦<sup>1,2</sup>, 李加庚<sup>1</sup>, 韩勤<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院半导体研究所 光电子材料与器件重点实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100190;

3. 中国人民解放军 93160 部队, 北京 100071)

**摘要:** 本文针对无人机空中目标探测系统的空间限制, 提出了一种多光束可分路扫描式被动调 Q 微片阵列全固态激光器的方案, 采用六管芯半导体激光器阵列端面紧凑泵浦长条状的 Nd:YAG/Cr<sup>3+</sup>:YAG 键合晶体, 在每一路 1.6 W 的泵浦功率下, 产生了 6 路波长为 1 064.4 nm、脉冲宽度为 2.4 ns、光束质量为 1.39、峰值功率为 3.75 kW、重复频率可达 22 kHz 的输出激光, 整个系统的体积仅为 2 cm×2 cm×1.5 cm, 实现了 6 路激光同时输出。研究了调 Q 晶体的初始透过率和输出镜反射率对激光脉冲重复频率和峰值功率的影响机制, 重点对泵浦源激光器管芯的出光一致性问题做了深入探讨, 通过实验验证了使用一个激光键合晶体产生多路纳秒级窄脉冲激光束的可行性。研究结果以小型化结构实现了被动调 Q 全固态激光器的多光束出射, 对实现激光探测系统光源的小型化和集成化有借鉴意义。

**关键词:** 激光测距; 全固态激光器; 微片阵列式; 小型化; 被动调 Q

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A

## Miniaturized microchip array passive Q-switched solid-state laser

WANG Zhen<sup>1,2</sup>, LI Li-Guang<sup>3</sup>, ZHAO Bai-Qing<sup>1,2</sup>, LI Jia-Geng<sup>1</sup>, HAN Qin<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Unit of 93160, Beijing 100071, China)

**Abstract:** To address the spatial constraints in unmanned aerial vehicle target detection systems, a scheme for a multi-beam scanning passive Q-switched microchip array solid-state laser is proposed. This system utilizes a six-core semiconductor laser array to compactly pump a strip-shaped Nd:YAG/Cr<sup>3+</sup>:YAG bonded crystal. At a pumping power of 1.6 W per path, it generates six output laser beams with a wavelength of 1 064.4 nm, pulse width of 2.4 ns, beam quality of 1.39, peak power of 3.75 kW, and a repetition frequency up to 22 kHz. The entire system's volume is only 2 cm×2 cm×1.5 cm, and achieves simultaneous output of six laser paths. The study investigated the impact mechanism of the initial transmittance of the Q-switching crystal and the reflectivity of the output mirror on the laser pulse repetition frequency and peak power, with a particular focus on the uniformity of the laser output from the pump source cores. The feasibility of using a single laser-bonded crystal to produce multiple narrow pulse laser beams in the nanosecond range was experimentally verified. The research results demonstrate the miniaturized structure's ability to achieve multi-beam emission from a passive Q-switched solid-state laser, providing insights for the miniaturization and integration of laser sources in detection systems.

**Key words:** laser ranging, solid-state laser, microchip array, miniaturization, passive Q-switched

收稿日期: 2023-11-08, 修回日期: 2023-12-24

Received date: 2023-11-08, Revised date: 2023-12-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB1805701); 国家自然科学基金 (61934003)

**Foundation items:** Supported by the National Key R&D Program of China (2020YFB1805701) and the National Natural Foundation of China (61934003)

**作者简介 (Biography):** 王震 (1996—), 男, 山东德州人, 博士生, 主要研究领域为全固态激光器及驱动电路方面的研究. Email: wangzhen@semi.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: hanqin@semi.ac.cn

## 引言

激光二极管泵浦的全固态激光器 (diode pumped solid-state laser, DPSSL) 具有体积小、结构紧凑、峰值功率高、光束质量好、使用寿命长等优点,被广泛应用在激光测距<sup>[1]</sup>、激光点火<sup>[2]</sup>、空间探测<sup>[3-4]</sup>、精密仪器<sup>[5-6]</sup>以及激光手术<sup>[7]</sup>等领域。相比于主动调Q全固态激光器,被动调Q全固态激光器不需要高压、高频信号的调制以及复杂的光路结构,凭借其小型化的优势更适合在户外场景中应用,是目前小型光电探测系统的优选光源<sup>[8]</sup>。虽然被动调Q全固态激光器已经深入到科研、工业等领域,但测距系统的实际应用场景对激光器的体积、抗振动的要求越来越严格,如何使全固态激光器进一步小型化来实现大视场探测,提升其复杂环境适应性,是该领域的研究热点。

在此背景需求下,国内外研究所和相关企业在全固态激光器小型化紧凑化方面的研究越来越深入,在泵浦源、激光晶体、谐振腔等方面不断改进,大大提高了被动调Q全固态激光器的实用性。在泵浦源改进方面,T. Dascalu等<sup>[9]</sup>报道了一种二极管泵浦的四光束输出被动调Q固体激光器用于激光点火领域,激光脉冲能量大于3 mJ,重复频率为5 Hz,脉冲宽度为0.9 ns; Bai Jiarong等<sup>[10]</sup>采用TEC控温的VCSEL阵列作为泵浦源侧面泵浦Nd:YAG zig-zag板条晶体,设计了可低温工作和100 °C以上的宽温区工作的纳秒级被动调Q全固态激光器,激光输出能量为21.5 mJ,脉宽为4.3 ns。上述研究使用激光二极管阵列替代了占用空间大的闪光灯泵浦系统,提高了泵浦光的利用效率,使得系统结构更加紧凑。在激光晶体改进方面,Liu Yuliang等<sup>[11]</sup>采用光胶合的Nd:YVO<sub>4</sub>/PPMgOLN晶体棒作为增益介质和倍频晶体制作了波长为532 nm的紧凑型微片阵列激光器,产生了3路总输出功率为223 mW的激光光束,具有47 mm×35 mm×25 mm的紧凑尺寸; Cheng Yong等<sup>[12]</sup>采用脉冲泵浦的Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG被动调Q微晶片激光器和大口径高分束阶二维衍射分束器,将近衍射极限的单光束分束成50×2交错排列的多光束阵列输出,分束后子光束的能量不均匀性<11%,衍射分束输出效率达85%。上述工作是从激光晶体角度减小了其占用空间,同时改善了晶体热效应,更容易实现大脉冲能量输出。在谐振腔改进方面,Wang Yongheng等<sup>[13]</sup>采用在Nd:YAG晶体的端面上直接镀膜的方式构成谐振腔,研制出一种

1 061 nm和1 064 nm双波长连续输出的Nd:YAG微片激光器;Wang Yu等<sup>[14]</sup>通过在键合晶体两端面镀膜构成平平腔,获得了一种小时间抖动、高重复频率的被动调Q微型激光器,重复频率为100 kHz时,脉冲时间抖动不稳定性小于±0.5%。上述在晶体表面镀膜形成谐振腔的方式避免了光学腔镜的使用与对准,从谐振腔角度进一步压缩了激光器体积的同时,也保证了激光稳定输出。

目前大多数研究集中在如何获得高峰值功率、高重复频率的激光方面,尽管在上述三个方面做了小型化改良工作,但大多数固体激光器的体积仍较大,很难应用到户外机载设备中。另一方面,上述研究主要是对单光束全固态激光器性能的改善,研究多光束阵列式全固态激光器的工作报道较少,然而当在室外环境下进行激光探测时,单束固体激光输出会受到云烟雾后向散射干扰引起误判,往往需要多光束方案来使用;由于应用系统体积的限制,采用单光束全固态激光器分束组合的方案,很难将整机系统做小。在光源模块体积小于3 cm×3 cm×3 cm的空间内实现六路峰值功率大于3 kW、重复频率大于20 kHz的窄脉宽激光,是本文的设计指标。

本文采用半导体激光器多管芯阵列端面紧凑泵浦Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG激光键合晶体,产生了6路波长为1 064.4 nm、脉冲宽度为2.4 ns、峰值功率为3.75 kW、重复频率可达22 kHz的输出激光。整个激光器模块无需光纤耦合,体积非常紧凑,仅为2 cm×2 cm×1.5 cm,实现了六路激光的同时输出,可通过光学系统实现不同视场光束分布。本文研究了调Q晶体的初始透过率和输出镜反射率对激光脉冲重复频率和峰值功率的影响机制,重点对泵浦源管芯阵列的出光一致性问题做了深入探讨,深入研究了泵浦源激光器阵列的工作波长对各路出光性能差异的影响。本工作的意义在于验证了使用一个激光键合晶体产生多路纳秒级窄脉冲激光束的可行性,以小型化结构实现了被动调Q全固态激光器的多光束出射,对实现激光探测系统光源的小型化和集成化有实用意义。

## 1 实验设计与理论计算

### 1.1 实验设计

激光二极管(Laser Diode, LD)端面泵浦的Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG六光束被动调Q微片阵列全固态激光器的实验结构如图1所示。实验装置由LD泵浦源阵列(LD1-LD6)、Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG键合晶体、

平凹柱透镜、氮化铝(AlN)陶瓷基板组成。

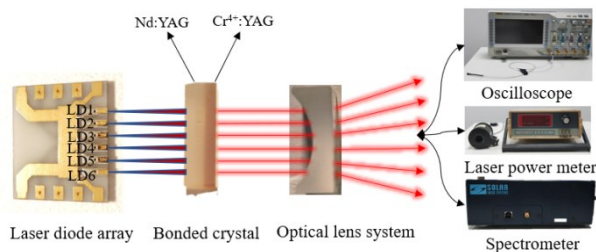


图1 端面泵浦的Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG六光束被动调Q微片阵列全固态激光器示意图

Fig. 1 Schematic of the six-beam Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG passive Q-switched microchip array end-pumped solid-state laser

实验所用的泵浦源阵列是大功率GaAs量子阱半导体激光器阵列,阵列由6个室温下中心波长为806 nm±2 nm、功率为2 W的单管激光器芯片组成,每个芯片尺寸为1 mm×0.5 mm,发光面积为1×150 μm<sup>2</sup>,芯片边缘间隔为0.5 mm,激光器管芯下表面电极通过导电银胶粘贴在AlN陶瓷基板的焊盘上,上表面电极则通过金丝与基板焊盘连接,保证泵浦源系统散热条件良好。泵浦方式采用紧耦合端面泵浦方式,将泵浦源阵列与激光晶体紧密贴合进行泵浦,在不使用准直光学系统的情况下,使光束未完全发散就已耦合进晶体内部,既实现了泵浦系统结构紧凑的小型化要求,又避免了准直系统对泵浦光的损耗差异,保证各路泵浦条件相同。

采用键合晶体Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG分别作为增益介质和被动调Q元件,键合晶体尺寸为10 mm×3 mm×3(2+1) mm,其中Nd:YAG晶体在泵浦光出射方向的长度为2 mm,Nd<sup>3+</sup>离子掺杂浓度为1.1%,晶轴方向是<111>;Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体长度则为1 mm,晶轴方向是<100>,初始透过率T<sub>0</sub>为90%,二者通过热键合的方式形成微片晶体。谐振腔采用在键合晶体平行度很高的两端面镀膜构成平平腔,键合晶体的厚度即谐振腔的长度,为3 mm。在键合晶体的入光端面镀808 nm高透膜(H<sub>T</sub>>98%)、1 064 nm全反膜(H<sub>R</sub>>99.8%),在键合晶体输出端面镀808 nm全

反膜(H<sub>R</sub>>98%)、1 064 nm部分反射膜(R=90%)构成输出耦合镜。

实验装置如图2所示,键合晶体放置在铜热沉上,用导热硅胶将其位置固定,将贴有泵浦源阵列的AlN陶瓷基板通过导热硅脂固定在紫铜热沉上,用于填充中间空隙以减小热阻,使得激光器出光面与Nd:YAG晶体入光面保持垂直,两者之间的距离为100 μm,在实现一定的耦合效率基础上,保证了良好的光束质量。表1展示了与其他参考文献的泵浦方案对比,可以看出本工作在增加出光通道数的基础上,体积更加紧凑,明显小于其他方案,具有阵列化、小型化的优势。

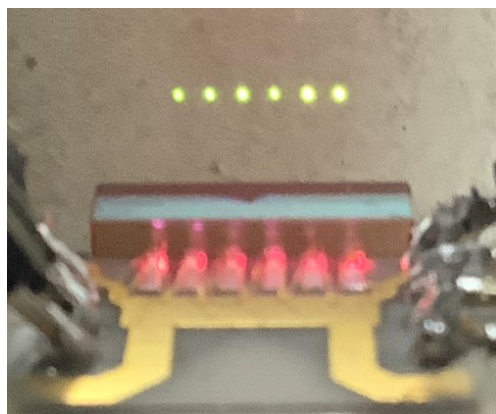


图2 端面泵浦的Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG被动调Q微片阵列全固态激光器实验装置

Fig. 2 Experimental setup of the Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG passive Q-switched microchip array end-pumped solid-state laser

## 1.2 被动调Q微片激光器数值仿真

基于主动激光探测<sup>[16-17]</sup>工作体制,高峰值功率可以实现更高的探测信噪比、更远的探测距离<sup>[18]</sup>。全固态激光器可以通过调Q技术产生数千瓦级别的峰值功率,成为适合远距离激光测距系统的有效光源方案<sup>[19-20]</sup>。高重复频率是被动调Q全固态激光器用于激光测距应用的另一个重要指标,重复频率越高,分辨率也会越高,对高速目标的响应也会越灵敏。因此,用于激光测距的全固态激光器在产生高

表1 与已发表文献中的工作性能对比

Table 1 Performance comparison of published works

Ref.	泵浦方式	光束耦合方式	出光通道数	谐振腔长度/mm	激光器总输出功率/mW	光模块体积/mm×mm×mm
[10]	侧面泵浦	透镜聚焦	1	110	2 000	110×10×10
[15]	端面泵浦	光纤耦合	1	22	860	97×20×10
[11]	端面泵浦	直接耦合	3	3.5	223.7	47×35×25
This work	端面泵浦	直接耦合	6	3	1 402	20×20×15



峰值功率保证足够探测距离的前提下,也要兼顾脉冲重复频率足够高。对于被动调Q方式来说,高峰值功率和高重复频率是相互制约的关系,需要通过仿真分析实现二者性能指标的权衡。被动调Q微片激光器的脉冲特性,如脉冲能量、峰值功率、脉冲宽

$$P = \frac{h\nu A l}{\gamma t_r} \left( \ln \frac{1}{R} \right) \left\{ n_i - n_t - n_{t0} \ln \frac{n_i}{n_t} - \frac{(n_i - n_{t0}) \left[ 1 - \left( \frac{n_t}{n_i} \right)^\alpha \right]}{\alpha} \right\}, \quad (2)$$

$$W = \frac{E}{P}, \quad (3)$$

$$F = \frac{k P_{LD}}{h\nu A l n_i}, \quad (4)$$

式中: $h\nu$ 为激光光子能量; $A$ 为有效泵浦光束截面; $\sigma$ 为Nd:YAG晶体受激发射截面; $\gamma$ 为能级简并因子; $R$ 为输出镜反射率; $n_i$ 、 $n_t$ 、 $n_{t0}$ 、 $n_{t0}$ 分别表示增益介质内初始反转粒子数密度、最终反转粒子数密度、脉冲峰值时反转粒子数密度、Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体饱和后的阈值反转粒子数密度; $l$ 为Nd:YAG晶体的长度; $t_r = 2l_s/c$ 为光子往返渡越时间, $l_s$ 为有效谐振腔长; $\alpha$ 为Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体饱和的难易程度; $P_{LD}$ 为泵浦源输出功率; $k$ 为有效光功率吸收系数; $E$ 为输出单脉冲能量; $P$ 为输出脉冲峰值功率; $W$ 为脉冲宽度; $F$ 为输出频率。

由式(1)、(2)、(3)可以看出,在激光晶体长度 $l$ 、有效泵浦光束截面 $A$ 和谐振腔长 $l_s$ 被确定的情况下,单脉冲能量 $E$ 、脉冲峰值功率 $P$ 和脉冲宽度 $W$ 与 $n_i$ 、 $n_t$ 、 $n_{t0}$ 、 $n_{t0}$ 的值有关,这些值都与Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体初始透过率 $T_0$ 和输出镜反射率 $R$ 有关。式(4)中有效泵浦光功率 $kP_{LD}$ 则影响了泵浦光产生反转粒子的重复频率,泵浦光功率不显著影响被动调Q固体激光器的脉冲峰值功率和脉冲宽度,而是主要影响其脉冲的重复频率<sup>[22]</sup>。

基于上述理论,本文使用Matlab对不同初始透过率和输出镜反射率的键合晶体的重复频率、峰值功率特性进行了仿真。在泵浦功率为1.6W、增益介质Nd:YAG长度为2mm、调Q晶体Cr<sup>4+</sup>:YAG长度为1mm的情况下,不同初始透过率 $T_0$ 和输出镜反射率 $R$ 条件下的重复频率曲线、峰值功率曲线如图3(a)、3(b)所示。

图3(a)显示了输出激光重复频率与调Q晶体初始透过率 $T_0$ 以及输出镜反射率 $R$ 的关系,当调Q晶体的初始透过率 $T_0$ 一定时,重复频率随输出镜反

射率、重复频率,由其速率方程组<sup>[21]</sup>推导得出,表达式如下所示:

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \left( \ln \frac{1}{R} \right) \left( \ln \frac{n_i}{n_t} \right), \quad (1)$$

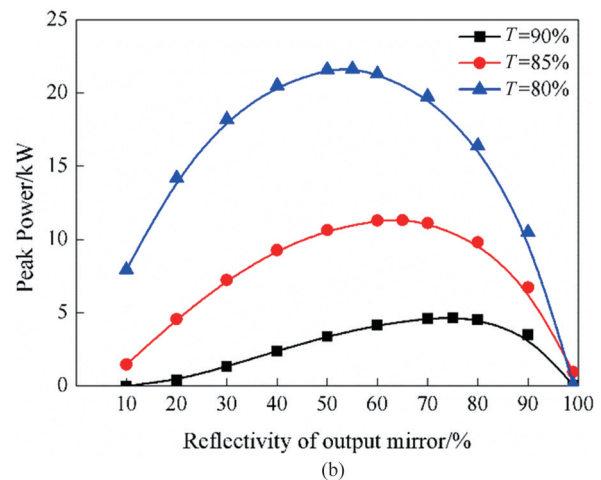
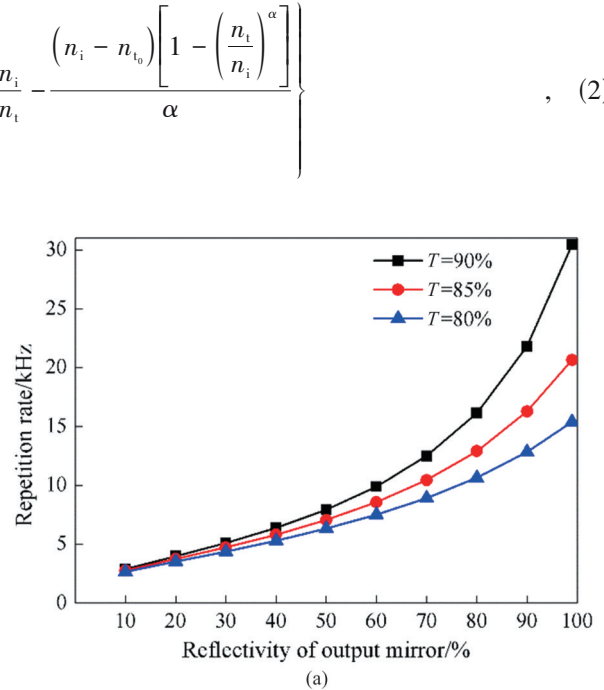


图3 重复频率和峰值功率:(a)重复频率随初始透过率 $T_0$ 和输出镜反射率 $R$ 的变化曲线;(b)峰值功率随初始透过率 $T_0$ 和输出镜反射率 $R$ 的变化曲线

Fig. 3 The repetition rate and the peak power: (a) variation curve of the repetition rate with the initial transmittance  $T_0$  and the output mirror reflectivity  $R$ ; (b) variation curve of the peak power with the initial transmittance  $T_0$  and the output mirror reflectivity  $R$

射率 $R$ 的提高而增加,这是由于输出镜反射率的增加使激光器谐振腔的损耗降低,腔中光强的积累速

度变快,从而导致 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体连续两次饱和的时间间隔缩短,激光脉冲输出的时间间隔变小<sup>[23]</sup>。而当输出镜反射率 $R$ 一定时,增大初始透过率 $T_0$ ,输出激光的重复频率随之增大,这是由于初始透过率 $T_0$ 的增加导致调Q晶体更快实现饱和,形成脉冲激光出射。

图3(b)显示了输出激光峰值功率与调Q晶体初始透过率 $T_0$ 以及输出镜反射率 $R$ 的关系,当调Q晶体的初始透过率 $T_0$ 一定时,输出激光的峰值功率随输出镜反射率 $R$ 先增大后减小,所以存在最佳输出镜反射率 $R_{\text{opt}}$ ,使峰值功率达到最大值,并且在不同初始透过率 $T_0$ 下对应不同的最佳输出镜反射率 $R$ 。本文为了满足单路激光重复频率大于20 kHz、峰值功率大于3 kW的设计指标,选择了 $T_0=90\%$ , $R=90\%$ 的参数对键合晶体进行加工。根据仿真结果,在1.6 W的泵浦功率下,重复频率可达23 kHz,峰值功率为4 kW。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 微片阵列式全固态激光器输出性能测试

我们首先测试了微片阵列全固态激光器的光学输出特性。实验使用六路管芯同时泵浦键合晶体,整个系统的出光情况如图4所示,可以看出,在同一块键合晶体上,同时产生了六束1 064 nm激光,这是本文实现小型化设计的关键部分。图4中光斑图像形状存在细微差异,其原因在于,六个泵浦源阵列管芯间隔为0.5 mm,产生多路激光输出时远场光斑存在重叠现象,为了方便观测,在键合晶体出光面外加了一个焦距为-12 mm的平凹柱透镜,出射光通过平凹柱透镜后传播方向产生微小差异,光斑在空间上分散以减小重叠。

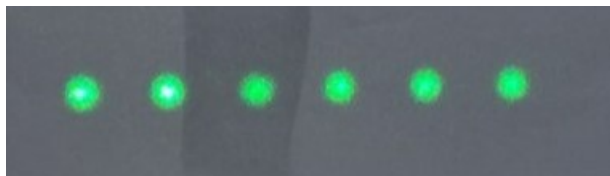


图4 六路同时工作的光斑图像

Fig. 4 Spot image with six channels working simultaneously

在激光平均输出功率为269 mW的条件下,实验测试了输出光的远场光斑形状和光束质量,其中 $d$ 为光斑直径。光束质量的测试方法:加入衰减片对光束进行衰减,再加入焦距为 $f=150$  mm的透镜对光束进行压缩,然后利用激光轮廓分析仪测量出光

束束腰位置以及束腰位置前后对称位置光斑的直径,输入软件拟合出相关曲线,求得光束质量 $M^2$ ,结果如图5所示。从图中可以看出,输出的光斑基本呈圆形,光斑光束质量 $M^2$ 为1.39。

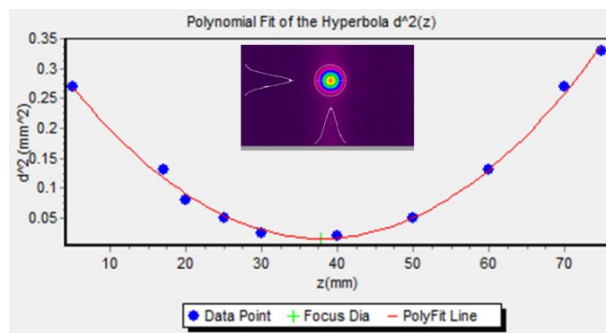


图5 激光器输出光束质量及远场光斑形状

Fig. 5 Output beam quality and far-field beam spot shape of laser

实验使用KEYSIGHT UXR-0402A数字示波器、InGaAs PIN光电探测器进行了输出脉冲宽度波形、重复频率的测量,使用ADVANTEST Q8384光谱分析仪测量了输出激光的波长,如图6所示。

图6(a)中显示了各路输出激光的脉冲宽度 $W$ 为2.4 ns,脉宽很窄且不随泵浦功率改变。窄脉宽是因为使用键合晶体与非键合晶体相比,谐振腔腔长由厘米量级缩短到3 mm,减少了光子往返时间,加速了脉冲能量释放;脉冲宽度不随泵浦功率改变,是因为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的初始透过率 $T_0$ 和输出镜反射率 $R$ 决定了不同功率下脉冲产生时腔内光子数基本一样,腔型不变损耗不变的情况下,光子衰减的速度基本恒定,每个脉冲从建立到结束的时间和总能量基本不变<sup>[15]</sup>。因此,被动调Q微片激光器在键合晶体确定后,不同位置出射激光的单脉冲能量、脉冲宽度以及峰值功率基本不随泵浦功率而改变。

图6(b)是在泵浦功率为1.6 W时,由KEYSIGHT UXR-0402A型号示波器统计得出的输出激光脉冲的平均重复频率 $F$ 约为22 kHz(仿真结果为23 kHz),标准差为156 Hz,重频抖动率为0.7%。此时测得平均输出功率 $P_{\text{out}}$ 为240 mW,根据峰值功率与平均功率的关系公式 $P = P_{\text{out}}/FW$ ,可得峰值功率为3.75 kW(仿真结果为4 kW)。图6(c)为测得的激光输出波长,为1 064.4 nm,线宽为26 pm,具有良好的单色性和相干性。上述实验结果验证了使用一个激光键合晶体产生多路纳秒级窄脉冲激光束

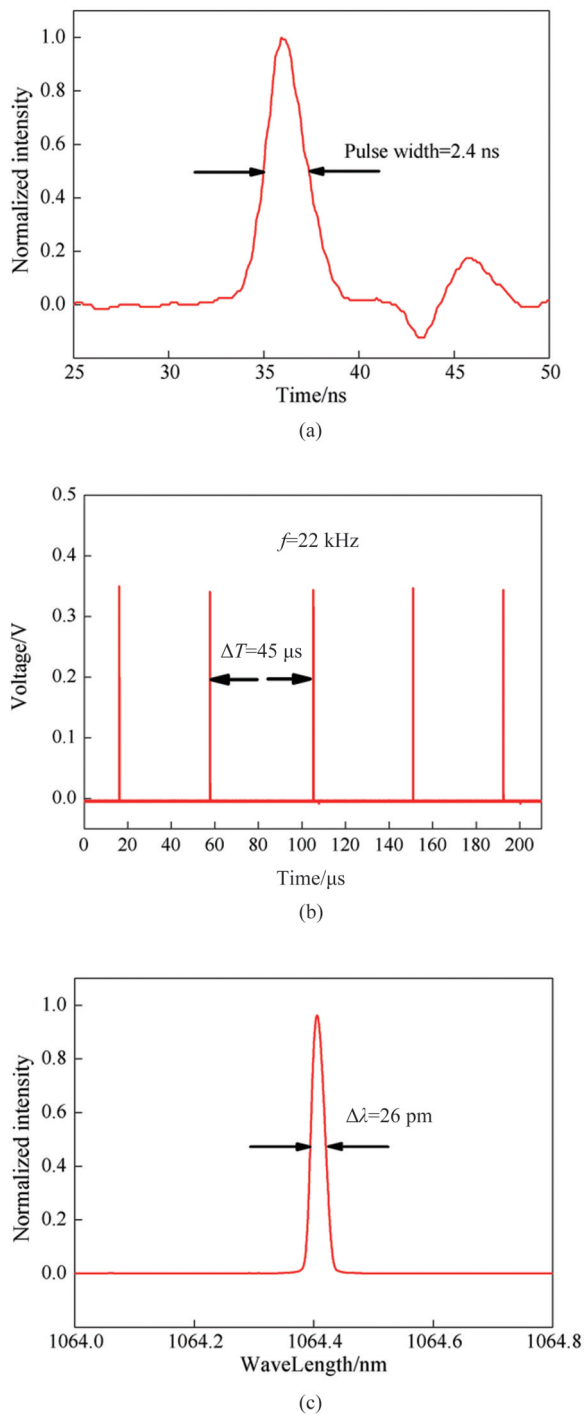


图6 脉冲宽度波形、脉冲序列波形及波长测量图:(a) 1 064 nm 输出激光的脉冲宽度波形;(b) 1 064 nm 输出激光的脉冲序列波形(重复频率为 22 kHz);(c) 输出激光的波长测量图(线宽为 26 pm)

Fig. 6 Pulse width waveform, pulse sequence waveform and wavelength measurement diagram: (a) pulse width waveform of the 1 064 nm output laser; (b) pulse sequence waveform of the 1 064 nm output laser (repetition rate is 22 kHz); (c) wavelength measurement diagram of the output laser (linewidth is 26 pm)

的可行性,该小型化的微片阵列全固态激光器可以满足本文设计指标对于重复频率、峰值功率和体积的要求。

## 2.2 多光束泵浦系统出光一致性分析

泵浦源管芯的泵浦功率影响着被动调Q阵列激光器每一路激光的出光频率,对于各项参数已经确定的键合晶体来说,泵浦功率越大,Nd:YAG晶体的粒子数反转速度越快,产生一个窄脉冲所需的时间越短,即出光重复频率越快。为了保证被动调Q微片阵列激光器各路出光频率的一致性,在泵浦源管芯都与键合晶体紧密贴合保证泵浦外部条件相同的前提下,必须要求各路管芯在不同激励条件下都有相同的输出功率。实验中用LP-3B型激光功率计测量了六路管芯在不同恒定电流 $I$ 驱动下的平均输出功率 $P_{\text{pump}}$ ,如图7所示。各管芯的 $P_{\text{pump}}$ 随泵浦电流的增大而线性递增, $P_{\text{pump}}-I$ 曲线斜率效率相近,约为0.84 W/A,说明泵浦源阵列的不同管芯在相同泵浦电流下输出光功率大致相同,可以保证被动调Q微片阵列激光器各路出光频率的一致性。

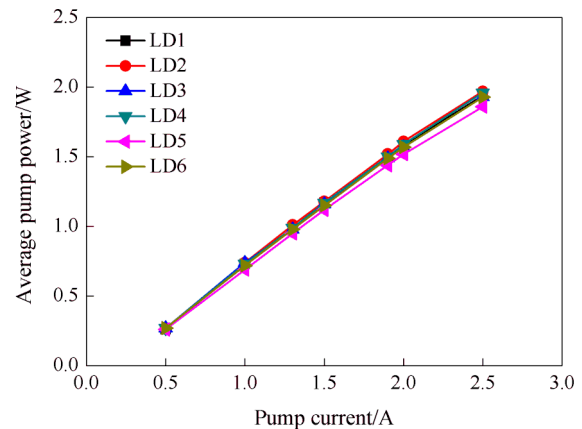


图7 六路管芯平均输出功率随不同电流的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of average output power of the six laser diodes with different currents

为了测试各路管芯的输出功率稳定性,当泵浦电流为 2 A 时,各路管芯的工作电压为 2 V,平均输出功率 $P_{\text{pump}}$ 为 1.6 W,计算可得各路管芯的电光效率约为 40%,使用功率计测量了 5 min 内各路管芯在 2 A 泵浦电流下的功率变化,绘制了各路管芯的功率不稳定性曲线,如图 8 所示。图 8 中表示了六路管芯在连续工作 5 min 内功率不稳定性均小于 0.8%,因此,在泵浦电流为 2 A 的条件下,各路管芯泵浦功率基本保持不变,有利于提高被动调Q微片阵列激光器出光频率的稳定性。



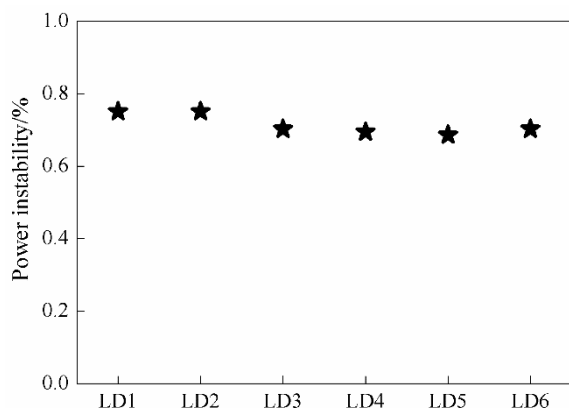


图8 六路管芯在1.6 W功率时5 min内的不稳定性曲线  
Fig. 8 Instability curve of six laser diodes within 5 minutes at 1.6 W power

被动调Q微片阵列激光器出光频率的变化还与泵浦源的波长密切相关,Nd:YAG晶体对于不同波长的泵浦光具有不同的吸收系数。半导体激光器的输出波长会随着有源区温度的变化而发生漂移<sup>[24]</sup>,漂移系数为0.28~0.3 nm/°C<sup>[25]</sup>。泵浦源工作波长的漂移会使得Nd:YAG晶体对泵浦光的吸收效率发生改变,从而使得产生光脉冲的时间不固定,引起出光频率变化。为了探究泵浦源管芯波长对出光频率的影响,实验在制作泵浦源阵列时将LD4作为短波长对照组,保证*P-I*性能基本一致情况下,LD4选用了初始波长为804.7 nm的短波长管芯。实验中用2 A的恒定电流分别驱动管芯,使用光谱分析仪每隔30 s测量一次波长,记录了5 min内各管芯波长的变化,如图9所示。

图9表明,各管芯的工作波长在5 min内均相对于初始波长发生了红移,并在120 s后达到了稳定状

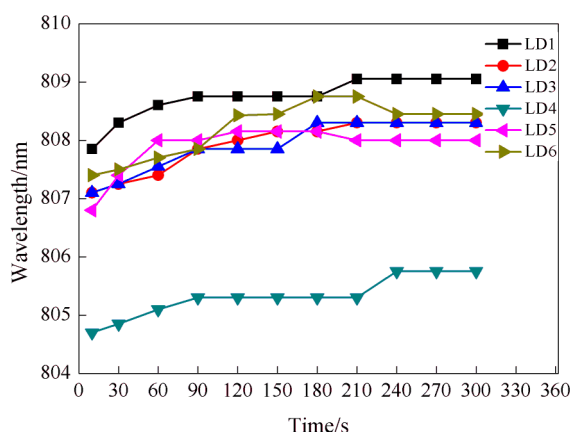


图9 电流为2 A时六路管芯5 min内的波长变化曲线  
Fig. 9 Wavelength curve of six laser diodes within 5 minutes when the current is 2 A

态。实验认为第5秒的波长为每个管芯的初始波长,第300秒的波长为每个管芯的最终波长,由此可以统计得出每个管芯在5分钟内的波长漂移值 $\Delta\lambda$ 。本文漂移系数 $\theta$ 取值为0.3 nm/°C,根据公式 $\Delta T = \Delta\lambda/\theta$ 可以得出每个管芯的温度升高值 $\Delta T$ 。从图9中可以看出,LD1~LD6的波长漂移值 $\Delta\lambda$ 分别为1.2 nm、1.2 nm、1.2 nm、1.05 nm、1.2 nm、1.05 nm,即温度升高值 $\Delta T$ 分别为4 °C、4 °C、4 °C、3.5 °C、4 °C、3.5 °C。可以看出,不同管芯的初始波长虽然有差异,但在相同电流下工作时具有良好的波长红移一致性和温升一致性。

为了探究泵浦源工作波长稳定后对微片阵列激光器出光频率的影响,实验对每一路激光在不同泵浦功率下的重复频率*F*进行了测量,绘制了*F-P<sub>pump</sub>*曲线,如图10所示。每一路激光的重复频率随着泵浦功率增加呈线性增大,除对照组LD4外的其他五路激光在重复频率上具有数值的一致性,五路激光在同时工作时可以保持性能变化的同步,但LD4与其他五路管芯在变化趋势上也具有一致性。当泵浦功率为1.6 W时,五路输出的重复频率集中在28 kHz左右,对照组LD4的重复频率低于其他管芯,为22 kHz。这是因为键合晶体对不同波长泵浦光的吸收效率不同,因此产生的激光脉冲重复频率也不同。图9中,除LD4外的其他管芯波长稳定后均在808~809 nm之间,可以与Nd:YAG晶体在808 nm附近的吸收峰良好匹配,具有最佳的吸收效率,产生1 064 nm激光输出重复频率很高;LD4稳定后的波长为805.75 nm,对应的吸收谱系数约为808 nm吸收峰值的一半,因此该对照组产生激光的重复频率较低,明显小于其他光束。这表明泵浦源稳定工作时的波长与增益介质吸收谱的匹配程度影响了出光频率的大小。

为了进一步探究六路管芯共同工作时泵浦功率对每一路激光平均输出功率的影响,分别对六路管芯进行了不同电流的连续泵浦,使用激光功率计测量了不同泵浦功率下的1 064 nm激光平均输出功率*P<sub>out</sub>*,并绘制了*P<sub>out</sub>-P<sub>pump</sub>*曲线,如图11所示。各路输出光功率*P<sub>out</sub>*随泵浦功率增大呈线性增加,当泵浦功率为1.6 W时,LD6的平均输出功率最高,为269 mW,LD4的平均输出功率最低,为172 mW。这与图10的结果相互印证,LD4作为对照组表明了当泵浦功率相同时,泵浦源工作波长与增益介质吸收谱的匹配程度会影响出光频率的大小,进而决定

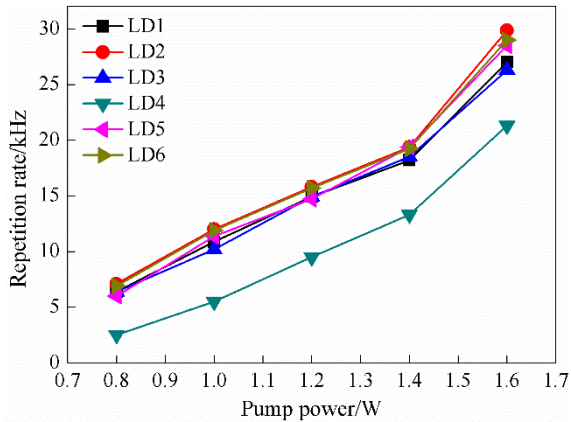


图10 重复频率随泵浦功率的变化曲线

Fig. 10 Variation curve of the repetition rate with the pump power

激光的平均输出功率。因此,后续对泵浦源阵列的制备需要对激光器管芯初始波长进行灵活选择,来实现全固态激光器阵列输出的一致性。

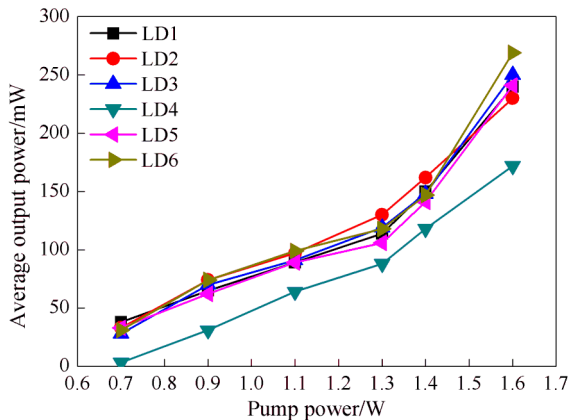


图11 输出功率随泵浦功率的变化曲线

Fig. 11 Variation curve of the output power with the pump power

由图9~11可以看出,泵浦源的初始波长会影响稳定工作波长的值,并对微片阵列激光器的出光频率、平均输出功率具有重要影响。当多路管芯同时工作时,整个泵浦模块产生的总热量比单管芯工作时更多,越靠近中间的管芯由于散热条件差于靠两侧的管芯,热积累速度更快,产生的波长漂移量更大,很容易远离808 nm的吸收峰,造成被动调Q微片阵列激光器出光不一致的情况。因此,为了保证管芯阵列同时工作时出光频率的一致性,不同位置管芯初始波长的选择需要根据连续工作或者脉冲驱动的工作方式、泵浦电流大小以及不同位置管芯的散热条件进行实验确定,采用不同位置管芯初始

波长由两侧到中间逐级减小的方法,使得各路管芯最终工作的波长都能稳定在808 nm的吸收峰附近,在追求高效率泵浦的前提下,实现激光器阵列各路出光频率的一致性。

实验测量了泵浦功率为1.6 W时,六路激光平均输出功率在3分钟内的变化曲线,如图12所示,并分别计算了六路输出功率的平均值 $P_{out}$ 、标准差 $\sigma_{P_{out}}$ ,六路激光器的相对标准差 $\sigma_{P_{out}}/P_{out}$ 分别为0.37%、0.52%、0.31%、0.68%、0.24%、0.60%。由数据可以看出,六路输出之间保持良好的功率稳定性。

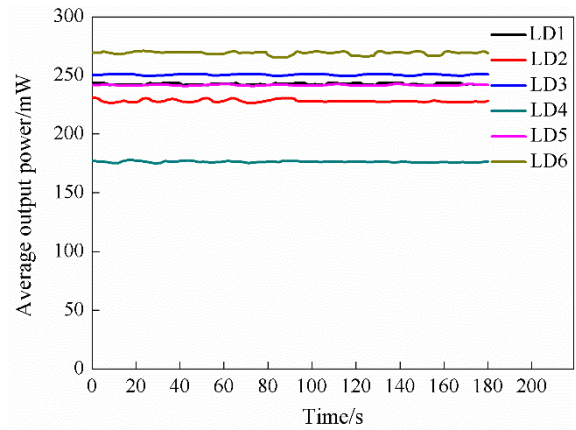


图12 泵浦功率为1.6 W时六路管芯3 min内的平均输出功率变化曲线

Fig. 12 Average output power curve of six laser diodes within 3 minutes when the pump power is 1.6 W

### 3 结论与展望

本文基于高空目标激光探测系统空间受限的背景下,对如何使用全固态激光器以小型化结构实现大视场探测进行了相关研究,提出了一种多光束可分路扫描式被动调Q微片阵列全固态激光器的方案,通过使用半导体激光器多管芯阵列对一块Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG键合晶体进行端面泵浦,产生了六路高峰值功率、高重复频率、窄脉宽的激光输出。激光器模块大小仅为2 cm×2 cm×1.5 cm,整个系统无需光纤耦合,体积更加紧凑。本文研究了调Q晶体的初始透过率和输出镜反射率对激光脉冲重复频率和峰值功率的影响机制,根据实验结果对微片阵列激光器的出光一致性问题做了深入探讨,从输出功率、工作波长等方面探究了影响各路出光一致性的因素,针对泵浦源系统不同位置热量分布差异对波长漂移的影响,提出采用不同位置管芯初始波长



由两侧到中间逐级减小的方法,使得各路管芯最终工作波长都能稳定在 808 nm 附近,保证各路出光频率的一致性。本工作的意义在于通过实验证实了使用一个激光键合晶体产生多路纳秒级超窄脉冲激光束的可行性,可以使全固态激光器能以小型化结构实现多路激光输出,对实现激光探测系统光源的集成化具有重要意义,也有助于高功率的全固态激光器应用在高空目标探测系统时减小占用空间,提高抗振动能力,提升其复杂环境适应性。

## References

- [1] Li Guang-ying, Zhou Qiang, Xu Guo-quan, *et al.* Lidar-radar for underwater target detection using a modulated sub-nanosecond Q-switched laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, **142**: 107234.
- [2] Fu Xing, Liu Ting-hao, Lei Xin-xing, *et al.* High Energy Diode-Pumped Rep-Rated Nanosecond Solid-State Laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, **48**(15): 1501003.
- [3] Zhang Duo, Wang Yu-lei, Chen Yi-fu, *et al.* Study on satellite pulse characteristics of LD-end pumped sub-nanosecond Nd: YAG/Cr<sup>3+</sup>: YAG oscillator [J]. *Optik*, 2023, **286**: 170889.
- [4] Ding Jian-yong, Yu Guang-li, Zheng Rui-lin, *et al.* A compact, high-power single-frequency laser based on Nd: YAG slab amplifier [J]. *Optics Communications*, 2020, **464**(15): 125534.
- [5] Liu Wei, Zang Qing, Ren Meng-fang, *et al.* Design of high-energy and high-frequency Nd: YAG laser used in EAST TS diagnostic [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, **51**(10): 20220002.
- [6] Huang Jian-ou, Li Chao, Lu Rong-guo, *et al.* Beyond the 100 Gbaud directly modulated laser for short reach applications [J]. *Journal of Semiconductors*, 2021, **42**(4): 041306.
- [7] Zhi Ting, Tao Tao, Liu Xiao-yan, *et al.* Low-threshold lasing in a plasmonic laser using nanoplate InGaN/GaN [J]. *Journal of Semiconductors*, 2021, **42**(12): 122803.
- [8] Tang Jing-ling, Bai Zhen-xu, Zhang Duo, *et al.* Advances in All-Solid-State Passively Q-Switched Lasers Based on Cr<sup>3+</sup>: YAG Saturable Absorber [J]. *Photonics*, 2021, **8**(4): 93.
- [9] Dascalu T, Croitoru G, Grigore O, *et al.* High-peak-power passively Q-switched Nd: YAG/Cr<sup>3+</sup>: YAG composite laser with multiple-beam output [J]. *Photonics Research*, 2016, **4**(6): 267.
- [10] Bai Jia-rong, Liu Yuan, Zhong Chao-yang, *et al.* Narrow Pulse Width lasers Operating over Wide Range of Low Temperature [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, **46**(1): 0101004.
- [11] Liu Yu-liang, Liang Wan-guo, Zhou Huang, *et al.* Compact 532 nm microchip laser array utilizing optical contact Nd: YVO<sub>4</sub>/PPMgOLN [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(6): 605003.
- [12] Cheng Yong, Liu Xu, Tan Chao-yong, *et al.* Research and development of spaceborne solid state laser technology for laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, **49**(11): 20201046.
- [13] Wang Yong-heng, Zhano Chang-ming, Cai zi-tao, *et al.* LD Pumped 1061 nm/1064 nm Dual-Wavelength Nd: YAG Microchip Laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, **47**(3): 0301002.
- [14] Wang Yu, Jiang Meng-hua, Hui Yong-ling, *et al.* Passively Q-Switched Nd: YAG/Cr<sup>3+</sup>: YAG Microchip Laser with Low Time Jitter and High Repetition Rate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(10): 1014004.
- [15] Li Jing-zhao, Chen Zhen-qiang, Zhu Si-qi. High-peak-power and short-pulse laser with a Yb: YAG/Cr<sup>3+</sup>: YAG/YAG composite crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(6): 606007.
- [16] Zhang Hai-tao, Tang Ru-feng, Li Zhu-lian, *et al.* Pre-processing method of laser ranging data based on array detection technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, **49**(8): 20190561.
- [17] Luo Chan-chan, Zhang Rui-ying, Qiu Bo-cang, *et al.* Waveguide external cavity narrow linewidth semiconductor lasers [J]. *Journal of Semiconductors*, 2021, **42**(4): 041308.
- [18] Guo Liang, Guo Ya-nan, Wang Jun-xi, *et al.* Ultraviolet communication technique and its application [J]. *Journal of Semiconductors*, 2021, **42**(8): 081801.
- [19] Zhang Yu-xia, Dong Liang, Han Wen-juan, *et al.* Efficient continuous-wave and passively Q-switched operation of an Yb: YPO<sub>4</sub> microchip laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, **160**: 109113.
- [20] Felipe M, Tomás J, Niklaus U. Sub-nanosecond, 41 mJ pulse energy, passively Q-switched Nd: YLF laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, **162**: 109257.
- [21] Koechner, Walter Bass, Michael. Solid-State Lasers [M]. 2003.
- [22] Su Yan-li, Luo Xu, Zhang Xue-hui, *et al.* Repetition rate continuously tunable microchip laser passively Q-switched by Cr<sup>3+</sup>: YAG [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(2): 355-359.
- [23] Liu Rui-ke, Wang Chao-chen, Niu Chang-dong. Optimal design of composite Nd: YAG/Cr<sup>3+</sup>: YAG passive Q-switched microchip laser [J]. *Laser Technology*, 2021, **45**(2): 218.
- [24] Tan Min, Ye Kai-xuan, Ming Da, *et al.* Towards electronic-photon-converged thermo-optic feedback tuning [J]. *Journal of Semiconductors*, 2021, **42**(2): 023104.
- [25] Lou Kang-ping, Zhao Bai-qin. Using multiple absorption peaks to lower DPSSL temperature control power dissipation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(4): 405004.