

# 基于复合材料的被动调 Q 固体激光器的研究进展

董 俊<sup>1,2</sup> 王光宇<sup>1,2</sup> 任滢滢<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>厦门大学信息科学与技术学院电子工程系, 福建 厦门 361005  
<sup>2</sup>厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 福建 厦门 361005)

**摘要** 短脉冲宽度、高峰值功率的被动调 Q 固体激光器在医疗、光通信、激光点火和非线性光学转换等领域具有重大的应用价值。通过热键合技术和陶瓷烧结技术将激光增益介质与可饱和吸收体键合到一起形成的被动调 Q 复合激光材料, 不仅能降低分离式激光增益介质和可饱和吸收体界面的散射和反射损耗, 以降低激光腔内损耗, 而且能消除二者之间的空气间隙, 避免激光器在高峰值功率运行时产生的等离子体所造成的空气击穿导致激光晶体的损伤, 保证激光器的稳定运行。针对基于复合材料的激光二极管抽运的小型化、集成化及高峰值功率的被动调 Q 固体激光器的研制和应用潜力, 系统介绍了基于 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG、Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料的被动调 Q 固体激光器的研究进展及其发展趋势。

**关键词** 激光器; 被动调 Q; Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG; Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG; 复合材料

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0601003

## Advances in Passively Q-Switched Solid-State Lasers Based on Composite Materials

Dong Jun<sup>1,2</sup> Wang Guangyu<sup>1,2</sup> Ren Yingying<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, School of Information Science and Technology,  
Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology,  
Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

**Abstract** Passively Q-switched solid-state lasers with short pulse width, high peak power are widely used in medical applications, optical communications, laser ignition and nonlinear optical conversion for generating new laser sources. Composite laser materials for passively Q-switched laser operation are successfully fabricated with thermal bonding technology and ceramic sintering technology. They alleviate the scattering and reflection loss induced in the surface of separated laser gain medium and saturable absorber, further mitigate the intracavity loss. Besides, composite laser materials eliminate the air gap between gain medium and saturable absorber. So the laser material damage is avoided and stable laser operation is maintained. Based on the potential applications of composite materials for passively Q-switched miniature, high peak power solid-state lasers, the advances and outlooks of passively Q-switched solid-state lasers based on Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG and Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG composite laser materials are reviewed in this paper.

**Key words** lasers; passively Q-switched; Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG; Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG; composite materials

**OCIS codes** 140.3480; 140.3530; 140.3540; 140.3580; 140.3615

## 1 引 言

激光二极管(LD)抽运的固体激光器因其效率高、结构紧凑、稳定性好等优点, 已成为固体激光领

域的研究热点。短脉冲序列、高峰值功率的被动调 Q 固体激光器在光通信、环境监测、材料加工、激光点火、高效非线性光学转换产生新型激光光源、生物

收稿日期: 2013-02-27; 收到修改稿日期: 2013-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(61275143)和教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-09-0669)资助课题。

作者简介: 董 俊(1970-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事激光陶瓷材料制备及固体激光技术等方面的研究。

E-mail: jdong@xmu.edu.cn

分子操控以及材料微观结构分析等领域具有重大的应用潜力<sup>[1]</sup>。被动调 Q 微片固体激光器通常是由掺杂 Nd 离子或 Yb 离子的激光材料作为增益介质和由半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 或掺杂 Cr<sup>4+</sup> 的晶体作为可饱和吸收体构成的。相对于 SESAM, Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体损伤阈值高、结构简单、成本低、在 850~1200 nm 波段具有较宽的吸收带宽<sup>[2, 3]</sup>, 在 LD 抽运的被动调 Q 激光器中得到了广泛应用。被动调 Q 激光器通常是在激光腔中插入 Cr<sup>4+</sup>:YAG 激光晶体或者陶瓷作为被动调 Q 开关来实现的, Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的插入损耗降低了激光器的运行效率, 而且激光器稳定运行的调节也将变得复杂, 不利于激光器维护。通过机械的方式将激光增益介质如 Nd:YAG 或 Yb:YAG 与可饱和吸收体 Cr<sup>4+</sup>:YAG 键合在一起, 采用不同的腔型结构在被动调 Q 激光器中可以获得高效的激光输出<sup>[4]</sup>。然而 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体与激光增益介质之间存在着空气间隙, 在大能量和高峰值功率运行的情况下容易在 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体与激光增益介质之间产生激光等离子体从而导致激光镀膜甚至是激光晶体的损伤, 严重地影响到了激光器的稳定运行。将 Nd 或 Yb 离子与 Cr 离子共同掺杂于同一基质如 YAG 晶体中构成了自调 Q 激光晶体如 Cr, Nd:YAG 和 Cr, Yb:YAG 晶体, 自调 Q 激光晶体将激光增益介质和可饱和吸收体结合在一起, 形成了一种新型的结构紧凑的被动调 Q 激光材料。LD 抽运的自调 Q 激光器获得了多脉冲高峰值功率激光输出, 为被动调 Q 微片激光器的发展注入了新的活力<sup>[5~7]</sup>。但是由于在 YAG 晶体基质中同时掺杂了可饱和吸收体与激活离子, 被动调 Q 开关初始透射率受激光材料长度的限制, 而且随着 Cr 离子掺杂浓度的增加, 自调 Q 激光晶体中的缺陷大量增加, 从而导致自调 Q 激光晶体在高的初始透射率情况下由于晶体的损耗增加, 无法获得激光输出, 不利于大能量、高峰值功率自调 Q 激光器的研制。而采用热键合技术或真空烧结技术将激光增益介质与可饱和吸收体分离地构建到一起形成激光增益介质与可饱和吸收体键合的复合激光材料, 不仅进一步减少激光腔的损耗, 消除空气间隙, 避免空气击穿; 而且相对于双掺晶体而言, 可以通过分别调节激光增益介质与可饱和吸收体的掺杂浓度及厚度来优化设计被动调 Q 激光器, 可有效地减少热透镜效应, 改善输出激光的光束质量, 增加转换效率。目前基于复合材料的被动调 Q 激光器的研究工作主要集中在 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 和 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG

这两种复合激光材料。本文系统地介绍了基于 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG, Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料被动调 Q 固体激光器的研究进展及其发展趋势。

## 2 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料被动调 Q 固体激光器的研究进展

1999 年美国林肯实验室的 Zayhowski<sup>[8]</sup>首次报道了 LD 抽运的 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体被动调 Q 微片激光器的研究成果, 获得了脉冲宽度为 400 ps、脉冲能量高达 14 μJ、峰值功率高达 30 kW 的被动调 Q 激光脉冲输出。随后利用低初始透射率的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体进一步压缩脉冲宽度获得了脉冲宽度为 218 ps 的激光脉冲输出<sup>[9]</sup>。然而美中不足的是这些激光器的效率只有 5%。2003 年陈军等<sup>[10]</sup>利用 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合单晶光纤获得了平均功率为 18 mW、重复频率为 10 kHz 的 1064 nm 波段的激光输出, 单脉冲能量为 1.8 μJ、脉冲宽度为 10 ns。由于 Nd:YAG 晶体中 Nd 离子的低浓度及复合晶体制备工艺的复杂性, 在随后的几年里, 基于 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料的高峰值功率被动调 Q 微片激光器的实质性研究报道并未出现。2007 年丁征等<sup>[11]</sup>报道了利用热键合技术制备的 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 激光器的实验和理论研究, 在抽运功率为 6 W 时获得了平均输出功率为 690 mW、脉冲宽度为 8.6 ns、斜率效率为 19.2% 的激光脉冲输出。2008 年 Sakai 等<sup>[12]</sup>利用 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体, 在准连续 LD 抽运下获得了高光束质量 ( $M^2=1.36$ )、峰值功率高达 2.1 MW 的被动调 Q 激光输出, 激光器的效率为 7.6%。2010 年刘磊等<sup>[13]</sup>利用 1.5 mm 厚单块 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 键合晶体作为工作物质, 用内蚀光栅 LD 作为抽运源, 在光学体积小于 1 cm<sup>3</sup> 条件下, 获得重复频率 8 kHz、峰值功率为 8.3 kW、脉冲宽度为 876 ps、 $M^2=2$  的单纵模激光输出。

1995 年, Hanson<sup>[14]</sup>采用扩散键合的 YAG-Nd:YAG-YAG 激光晶体进行了 LD 抽运的激光实验, 实验装置如图 1 所示。激光增益介质为由中间的 Nd:YAG 和两端的未掺杂的 YAG 组成的复合棒状结构, 采用端面抽运, 在室温下获得了高效的 946 nm 和 473 nm 的激光输出。通过在 Nd:YAG 晶体两端键合未掺杂的 YAG 晶体有效地抑制了热透镜效应, 获得了高光束质量的激光输出, 为键合激光晶体在固体激光器中的应用奠定了实验基础。

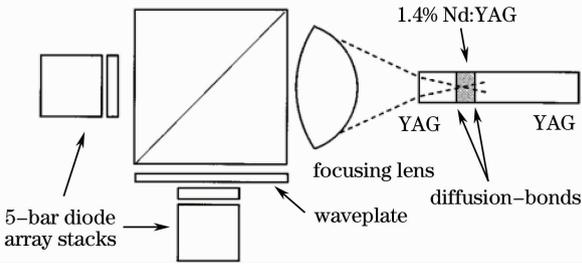


图1 LD阵列抽运复合Nd:YAG棒状材料激光器

Fig. 1 LD array pumped composite Nd:YAG laser

2000年,Armstrong等<sup>[15]</sup>对比了采用熔化和光学接触两种方法获得的Nd:YAG和未掺杂的YAG构成的复合棒状结构的光学性能,发现后者性能更优良,去偏振损耗和热损耗更小。但由于当时键合技术条件的限制,Nd:YAG和YAG的边界会引入巨大的腔内损耗,因此键合晶体的激光性能不是很好,而且采用扩散键合技术制备复合材料比较困难且成本较高。

2001年,Pavel等<sup>[16]</sup>报道了LD端面抽运的Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体被动调Q复合Nd:YAG晶体棒激光器。采用图2所示实验装置进行实验,增益介质为采用扩散键合技术制备的复合YAG-Nd:YAG晶体棒,其中,Nd:YAG晶体长5.0 mm,Nd离子的掺杂浓度为1.1%(原子数分数,下同),未掺杂的YAG厚1.0 mm。当抽运光功率为18.6 W时,获得的平均输出功率为2.6 W,激光脉冲的脉冲宽度为16.8 ns、脉冲能量为272 μJ、峰值功率为16.2 kW。光束质量因子 $M^2=1.4$ 。当进一步增加抽运光功率可获得的最大平均功率为4.2 kW,重复频率为24.0 kHz,脉冲宽度为47.8 ns, $M^2=1.34$ 。

2003年,Feldman等<sup>[3]</sup>报道了LD抽运的Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体被动调Q微片激光器。Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体是通过光学接触和扩散键合技术制备的,直径为10 mm,Nd:YAG部分厚4 mm,Nd离子的掺杂浓度为1.1%,Cr:YAG

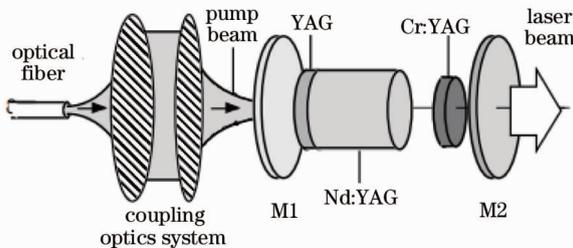
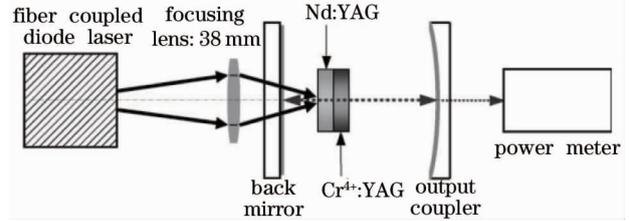


图2 LD抽运的复合Nd:YAG晶体棒被动调Q激光器

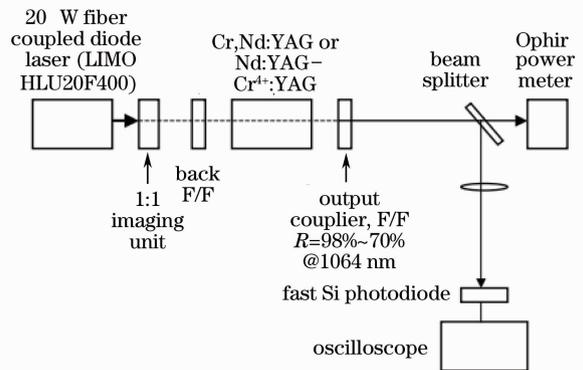
Fig. 2 LD-pumped passively Q-switched composite

Nd:YAG laser

部分厚2 mm,初始透射率在84.6%~96.6%之间变化。采用如图3所示光纤耦合LD抽运的平凹腔实验装置,在入射抽运光功率为9.0 W时,获得了平均输出功率超过2.0 W的激光输出,斜率效率为57%。随抽运功率的增加,重复频率在2.7~37 kHz之间变化,脉冲宽度约为5.6 ns。

图3 LD抽运的Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体被动调Q激光器Fig. 3 LD pumped Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG composite crystal passively Q-switch laser

2004年,Kalisky等<sup>[17]</sup>采用图4所示实验装置对比了连续LD抽运的Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体被动调Q激光器和双掺Cr,Nd:YAG自调Q激光器的激光性能,研究结果表明在相同的实验条件下,Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体的激光性能优于Cr,Nd:YAG自调Q激光晶体的,特别是采用Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体可获得更高的平均输出功率和峰值功率。在二极管抽运的激光实验中,双掺Cr,Nd:YAG自调Q晶体棒长4.0 mm,直径为5.0 mm,Nd离子的掺杂浓度为1%,Cr<sup>4+</sup>:YAG的初始透射率约为90%。在入射抽运光功率为7.7 W的条件下,激光器的平均输出功率为1.86 W,斜率效率约为34%,光-光转换效率为24%,脉冲宽度为14~16 ns,峰值功率为1.8 kW。采用扩散键

图4 连续LD抽运的Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体被动调Q激光器或双掺Cr,Nd:YAG自调Q激光器Fig. 4 Continuous-wave LD pumped Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG passively Q-switched laser or Cr,Nd:YAG actively Q-switched laser

合技术制备的 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体是由长 5.0 mm 未掺杂的 YAG、长 5.5 mm 的 Nd:YAG 和长 0.5 mm 的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 构成。Nd 离子的掺杂浓度为 1.1%，Cr<sup>4+</sup>:YAG 的初始透射率为 85%，在同等实验条件下，产生了更好的激光输出，其平均输出功率为 2.2 W，斜率效率为 42%，光-光转换效率为 28%，峰值功率为 3.6 kW。

2005 年, Kracht 等<sup>[18]</sup> 采用图 5 所示实验装置, 对比了复合 Nd:YAG 晶体和复合 Nd:YAG 陶瓷棒对 LD 端面抽运的高功率激光性能的影响。其中, 抽运源为 10 根光纤耦合的 LD, 复合 Nd:YAG 晶体和陶瓷棒的直径为 3 mm, 掺 Nd 部分的掺杂浓度为 0.1%, 长度为 40 mm, 左右两端各有 7 mm 长的 YAG 作为帽子。实验发现, 采用复合 Nd:YAG 晶体, 获得了最大功率为 121 W 的连续激光输出, 光-光转换效率为 48%; 采用复合 Nd:YAG 陶瓷棒, 输出功率为 113 W, 光-光转换效率为 47%。研究表明, 复合 Nd:YAG 陶瓷棒的光学激光性能与复合 Nd:YAG 晶体的性能基本一致。而采用陶瓷烧结技术制备的 Nd:YAG 透明激光陶瓷在大规模生产、大尺寸激光材料制备以及高浓度掺杂等方面表现出来的优势是 Nd:YAG 晶体生长所无法比拟的, 因此 Nd:YAG 陶瓷是一种非常有前景的高功率端面抽运激光材料。

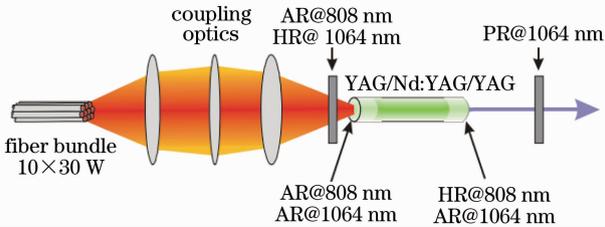


图 5 LD 端面抽运复合 Nd:YAG 激光材料高功率激光装置图

Fig. 5 Schematic diagram of ceramic composite Nd:YAG for high power diode end-pumping

2005 年, Zhang 等<sup>[19]</sup> 采用图 6 所示实验装置进行 YAG-Nd:YAG-YAG 复合激光材料的被动调 Q 和锁模的 946 nm 激光实验。采用 808 nm 的 LD 作为抽运源, 增益介质为采用扩散键合技术制备的复合 Nd:YAG 晶体, 复合晶体分为 YAG、Nd:YAG、YAG 晶体三段, 长度均为 3 mm, 其中 Nd:YAG 晶体中 Nd 离子的掺杂浓度为 1.0%。采用复合晶体不仅有利于 Nd:YAG 晶体的双向热传输, 而且提高了晶体的损伤阈值。可饱和吸收体为双掺的 Nd, Cr:YAG 晶体。在入射抽运光功率为 16.5 W 时, 获得

平均输出功率为 600 mW, 重复频率为 42 kHz, 脉冲宽度为 570 ns, 脉冲能量为 14.3 μJ 的调 Q 激光脉冲输出。进一步的研究表明可饱和吸收体的初始透射率越低, 调 Q 脉冲的宽度越窄, 锁模脉冲的调制深度越长。

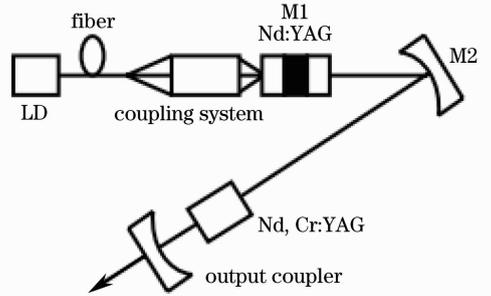


图 6 被动调 Q 锁模 946 nm Nd:YAG 激光装置图  
Fig. 6 Schematic setup of a passively Q-switched and mode-locked 946 nm Nd:YAG laser

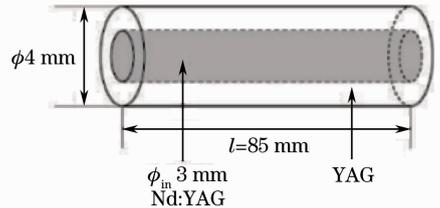


图 7 复合 Nd:YAG 陶瓷棒结构

Fig. 7 Structure of composite Nd:YAG ceramic rod

2006 年, Yagi 等<sup>[20]</sup> 报道了侧面抽运的 Nd:YAG 复合陶瓷激光器。研究中采用的 Nd:YAG 复合陶瓷棒中, 棒芯为掺杂原子数分数为 0.8% 的 Nd:YAG, 包层部分为 YAG, 如图 7 所示。实验采用图 8 所示装置, 利用全反射原理采用虚拟点往返抽运技术使 Nd:YAG 复合陶瓷吸收足够的抽运光, 当抽运光功率为 290 W 时, 实现了最大输出功率为 70 W, 斜率效率为 29%, 波长为 1064 nm 的激光输出, 激光性能比同等条件下单一的 Nd:YAG 陶瓷性

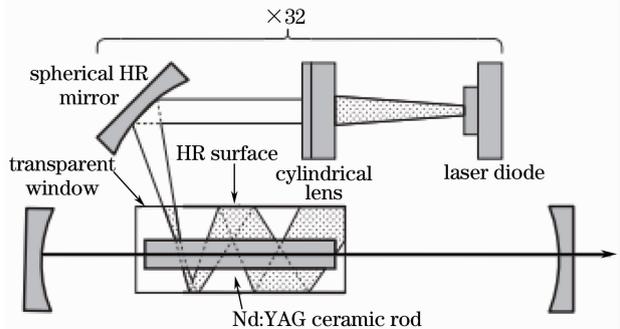


图 8 虚拟点源抽运 Nd:YAG 复合陶瓷激光器实验装置图  
Fig. 8 Schematic diagram of Nd:YAG composite ceramic lasers pumped with virtual point pumping source

能提升了25%。

2007年, Yin等<sup>[21]</sup>报道了紧凑型侧面抽运键合Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体板条微片激光器的实验结果, 激光实验装置如图9所示。采用连续808 nm的LD阵列作为抽运源, 增益介质Nd:YAG晶体尺寸为11 mm×4 mm×2 mm, Nd离子的掺杂浓度为1.1%。可饱和吸收体Cr:YAG晶体的尺寸为1.5 mm×4 mm×2 mm, 初始透射率为90%。Nd:YAG晶体和Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体经高温键合到一起, 构成尺寸为12.5 mm×4 mm×2 mm的复合晶体。12.5 mm×4 mm的这一面固定到用于散热的热沉上。实验中获得了平均输出功率为4.75 W, 重复频率为9 kHz, 脉冲宽度为12 ns, 峰值功率为43.9 kW的激光输出。利用这种大面积板条状的Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体作为抽运光的吸收面积散热面有利于散热, 缓解固体激光器的热效应, 从而可获得高峰值功率的激光输出。

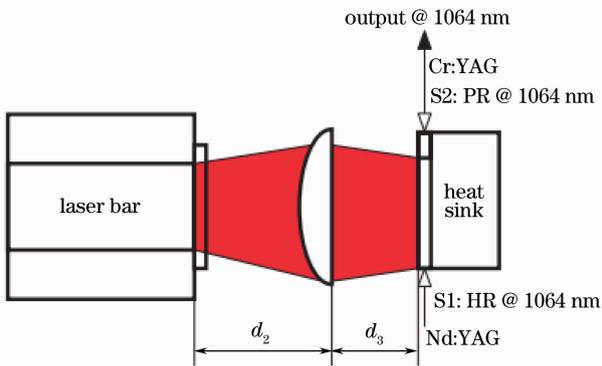


图9 侧面抽运键合板条微片激光器的实验装置图

Fig. 9 Scheme of the side-pumped bonded slab microchip laser setup

2007年, Lei等<sup>[22]</sup>报道了一种紧凑型稳定的重复频率连续可调的被动调Q Nd:YAG微片激光器的实验结果。激光增益介质为厚度为0.8 mm、直径为7 mm的Nd:YAG晶体, Nd离子的掺杂浓度为1.6%。可饱和吸收体为厚度为0.2 mm、直径为6.8 mm的Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体, 初始透射率为90%。经过精密光学抛光后的Nd:YAG晶体与Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体在光学接触之后, 通过热键合的方法固定到一起形成Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体。激光实验装置如图10所示。采用脉冲LD作为抽运源, 通过控制电脉冲的占空比和LD的温度, LD抽运的Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体被动调Q微片激光器获得了重复频率为10 kHz, 延迟时间为90 μs的稳定激光脉冲输出, 脉冲宽度为2 ns, 脉冲能量为

2.8 μJ。

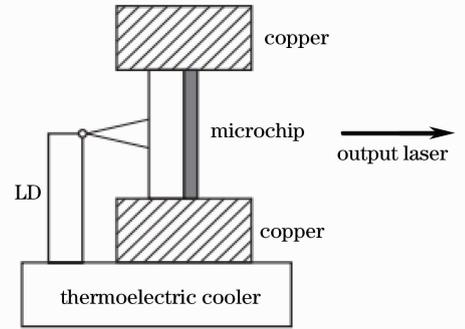


图10 紧凑型重复频率连续可调的被动调Q Nd:YAG微片激光器实验装置

Fig. 10 Experimental setup of the repetition rate continuously controllable compact passively Q switched Nd:YAG microchip laser

2008年, Miao等<sup>[23]</sup>报道了LD抽运的高效Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体被动调Q激光器。利用散射键合技术制备的Nd:YAG-Cr:YAG复合晶体作为工作物质, 如图11所示, 其中Nd:YAG晶体的尺寸为φ3 mm×7 mm, Nd离子的掺杂浓度为1.0%; Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体的尺寸为φ3 mm×1 mm, 初始透射率为70%。用中心波长为806.5 nm的5 W连续LD作为抽运源, 用图12所示装置进行实验, 腔长约为32 mm。当入射抽运光功率为3.3 W时, 获得了最大平均输出功率为592 mW的激光输出, 光-光转换效率为18%, 激光脉冲的重复频率为16.3 kHz, 脉冲宽度为6 ns, 峰值功率为6.5 kW。实验结果表明, 基于由掺Nd的材料与Cr:YAG构成的复合晶体是设计高峰值功率、窄脉冲宽度的紧凑、廉价的被动调Q激光器的很有前景的材料。



图11 复合Nd:YAG-Cr:YAG晶体结构示意图

Fig. 11 Configuration of the diffusion-bonded composite Nd:YAG-Cr:YAG crystal

2009年, Wang等<sup>[24]</sup>报道了LD端面抽运紧凑型Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体被动调Q激光器。Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体中Nd:YAG晶体的尺寸为4.5 mm×4.5 mm×5 mm, Nd离子的掺杂浓度为1%, Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体的尺寸为4.5 mm×4.5 mm×2 mm, 初始透射率为76%。用图13所示装置进行激光实验, 腔长为8 mm。在入射抽运光功率为11.8 W时, 获得了最短脉冲宽度为2.05 ns、

重复频率为 17.1 kHz、平均输出功率为 1.15 W、脉冲能量为 67.3  $\mu$ J、峰值功率为 32.8 kW 的激光脉冲。

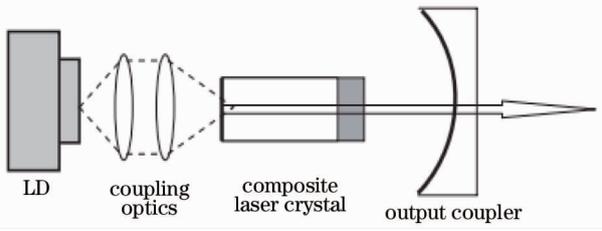


图 12 LD 抽运的 Nd:YAG-Cr:YAG 复合晶体被动调 Q 激光器示意图

Fig. 12 Schematic diagram of LD pumped Cr:YAG passively Q-switched laser with composite crystal

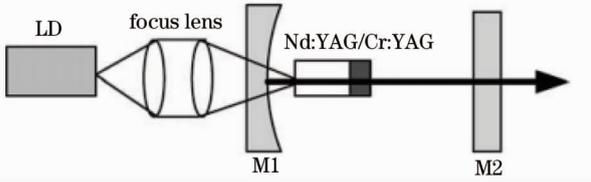


图 13 LD 端面抽运 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体被动调 Q 激光器

Fig. 13 LD end-pumped Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG composite crystal passively Q-switched laser

2010 年, Tauer 等<sup>[25]</sup>报道了工作在 946 nm 的 Nd:YAG 毫焦被动调 Q 激光器。激光工作物质为长 6 mm、直径为 4 mm 的 Nd:YAG 晶体, 通过扩散键合技术与可饱和吸收体 Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合到一起形成一系列 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体, 如图 14 所示, 其中 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的初始透射率在 40%~90% 之间变化。实验装置如图 15 所示。实验结果表明, 当 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的初始透射率为 80% 时, 输出耦合镜的反射率为 80% 时, 输出激光的性能最佳。此时, 获得的激光脉冲的重复频率为 10 Hz、脉冲宽度为 14 ns、脉冲能量为 2 mJ, 这是工作在 0.9  $\mu$ m 的紧凑型被动调 Q 固体激光器的所能获得的最高脉冲能量。

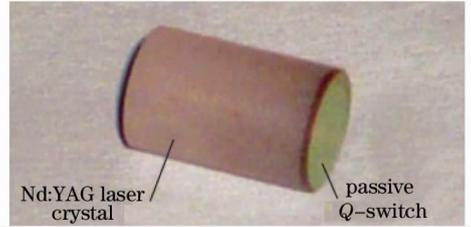


图 14 Nd:Cr:YAG 晶体示意图

Fig. 14 Photo of the Nd, Cr:YAG laser crystal

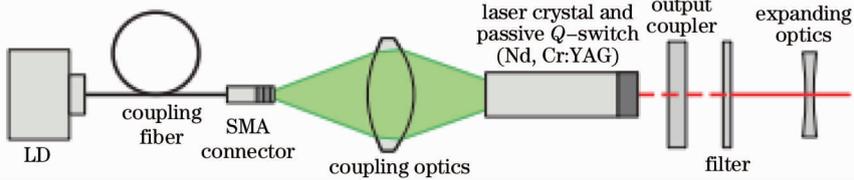


图 15 LD 抽运的 946 nm Nd:YAG 毫焦被动调 Q 激光器

Fig. 15 LD pumped 946 nm passively Q-switched Nd:YAG laser with mJ-class pulse energy

2011 年, Zhang 等<sup>[26]</sup>首次报道了 LD 抽运的 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体腔内三倍频 355 nm 被动调 Q 紫外激光器。实验中采用的工作物质是通过扩散键合技术制备的 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体, 复合晶体的尺寸为 4 mm  $\times$  4 mm  $\times$  7 mm, 其中 Nd:YAG 晶体的长度为 5 mm, Nd 离子的掺杂浓度为

1.0%; Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的长度为 2 mm, 初始透射率为 76%。实验装置如图 16 所示。在入射抽运光功率为 7.2 W 时, 获得最大输出功率为 110 mW, 光-光转换效率为 1.5%,  $M^2 = 2.95$ , 获得的最小脉冲宽度为 23.9 ns, 最高重复频率为 19.6 kHz, 脉冲能量为 5.6  $\mu$ J, 峰值功率为 0.23 kW。

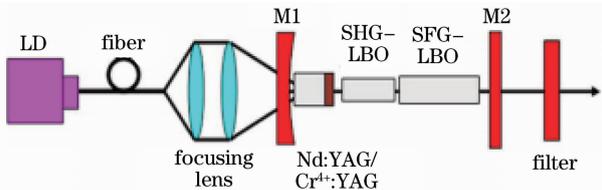


图 16 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体腔内三倍频 355 nm 激光器

Fig. 16 Schematic diagram of the Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG composite crystal intracavity frequency-tripled 355 nm laser

2011 年, Ma 等<sup>[27]</sup>报道了 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体角立方棱镜腔被动调 Q 激光器。激光实验装置如图 17 所示, 激光工作物质是通过热键合技术制备的 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体, 其中 Nd:YAG 晶体为增益介质, 晶体的半径为 1.5 mm, 长度为 60 mm, Nd<sup>3+</sup> 离子的掺杂浓度为 0.5%; Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体作为可饱和吸收体, 晶体的半径为 1.5 mm, 长度为 4 mm, 初始透射率为 35%。角立方棱镜 M1 的直径为 6 mm, 为全反射镜。输出耦合镜 M2 为平面镜, 透射率为 55%。激光器的总腔长为 125 mm,

实验温度可在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变化。激光器输出的激光脉冲的重复频率为 $5\text{ Hz}$ ，为满足实际需要将激光器设定为8个工作周期，且每个周期包括60 s的工作时间和60 s的休息时间。在室温分别为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下，采用角立方棱镜腔，经过8个工作周期，测得激光器的平均输出脉冲能量的波动分别为 $0.48\%$ 、 $0.69\%$ 和 $1.1\%$ ；相同条件下，采用平平腔，其平均输出脉冲能量的波动分别为 $3.2\%$ 、 $5.7\%$ 和 $7.5\%$ 。当设定实验温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，采用角立方棱镜腔，经过8个工作周期，测得激光器输出激光束的发散角的波动为 $0.08\text{ mrad}$ ；相同条件下，采用平平腔，其光束发散角的波动为 $0.54\text{ mrad}$ 。由于角立方棱镜有助于补偿激光晶体中的热透镜效应，在实验温度从 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时，相对于同等条件下的平平腔，采用角立方棱镜腔的激光器对热不敏感，其激光性能变化更小，稳定性更好，但这种激光器也存在一定的缺点，比如调整困难等，并且相对于常见的微片激光器而言，它并不是一个主流的激光腔型。

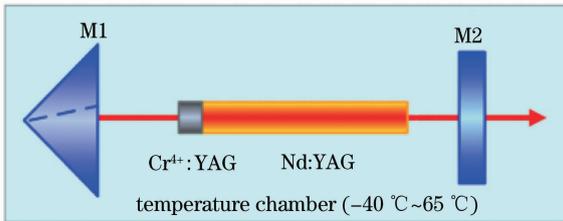


图 17 Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG 复合晶体角立方棱镜腔被动调Q激光器

Fig. 17 Passively Q-switched Cr<sup>3+</sup>:YAG-Nd:YAG laser with corner cube prism cavity

2011年，Meng等<sup>[28]</sup>报道了单管LD抽运的复合Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG晶体被动调Q激光器。实验装置如图18所示，单管LD抽运源固定在可由TEC进行温控的铜块上。在激光工作物质Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG复合晶体中，Nd:YAG晶体的尺寸为 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ ，Nd<sup>3+</sup>离子的掺杂浓度为 $1.0\%$ ；Cr<sup>3+</sup>:YAG晶体的尺寸为 $3\text{ mm}\times 3\text{ }\mu\text{m}\times 0.75\text{ mm}$ ，初始透射率为 $76\%$ 。在入射抽运光功率为 $2.75\text{ W}$ 条件下，获得了最大平均输出功率为 $365\text{ mW}$ 、最短脉冲宽度为 $1.7\text{ ns}$ 的脉冲激光输出，光-光转换效率为 $13.3\%$ ，激光脉冲的重复频率为 $14.6\text{ kHz}$ ，单脉冲能量为 $25\text{ }\mu\text{J}$ ，峰值功率为 $14\text{ kW}$ 。

2011年，日本的Pavel等<sup>[29]</sup>报道了可用于汽车引擎多点点火的准连续LD抽运的三光束输出、高功率Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG复合陶瓷被动调Q

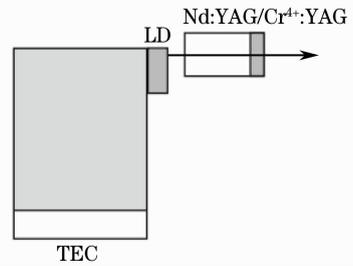


图 18 单管 LD 抽运的脉冲宽度为 $1.7\text{ ns}$ 的 Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG 复合晶体被动调Q激光器的实验装置图  
Fig. 18 Experimental setup of single laser-diode-pumped Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG composite crystal microchip laser with pulse width of  $1.7\text{ ns}$

激光器。LD 多点抽运的Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG复合陶瓷被动调Q激光器的实验装置如图19所示。采用三根独立的波长为 $807\text{ nm}$ 的光纤耦合的LD作为抽运源，抽运源的重复频率为 $5\text{ Hz}$ ，脉冲宽度为 $250\text{ }\mu\text{s}$ 。激光工作物质是在高温下通过扩散键合技术制备的Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG复合陶瓷。Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG复合陶瓷试样的直径为 $9\text{ mm}$ ，其中Cr<sup>3+</sup>:YAG陶瓷的厚度为 $2.5\text{ mm}$ ，初始透射率为 $30\%$ ；而Nd:YAG陶瓷的厚度和Nd离子的掺杂浓度分别为：1)  $7.5\text{ mm}$ 厚，Nd<sup>3+</sup>离子掺杂浓度为 $1.1\%$ ；2)  $5\text{ mm}$ 厚，Nd<sup>3+</sup>离子掺杂浓度为 $1.5\%$ ；3)  $3.5\text{ mm}$ 厚，Nd<sup>3+</sup>离子掺杂浓度为 $2.0\%$ 。采用两种聚焦方式来调节入射抽运光的光斑直径分别进行实验来研究抽运光斑大小对激光性能的影响。采用抽运光光斑直径为 $1\text{ mm}$ 的抽运方式，选用Nd:YAG陶瓷厚度为 $7.5\text{ mm}$ 、Nd<sup>3+</sup>离子掺杂浓度为 $1.1\%$ 的Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG复合陶瓷作为工作物质，获得了脉冲能量为 $2.4\text{ mJ}$ ，峰值功率为 $2.8\text{ MW}$ 的激光输出。如此高功率小型化端面抽运的Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG复合陶瓷激光器是汽车激光点火的首选，为这种小型化激光器在汽车引擎多点点火应用方面奠定了坚实的实验基础。

2012年，G. Salamu等<sup>[30,31]</sup>报道了准连续LD抽运的复合多晶陶瓷Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG被动调Q固体激光器。实验对比了两种规格的Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG复合陶瓷。一种Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG复合陶瓷中Nd:YAG陶瓷的厚度为 $7.2\text{ mm}$ ，Nd离子掺杂浓度为 $1.1\%$ ；Cr<sup>3+</sup>:YAG陶瓷的厚度为 $2.3\text{ mm}$ ，初始透射率为 $30\%$ ；另一种Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG复合陶瓷中Nd:YAG陶瓷的厚度为 $5.2\text{ mm}$ ，Nd离子掺杂浓度为 $1.5\%$ ，Cr<sup>3+</sup>:YAG陶瓷的厚度为 $2.3\text{ mm}$ ，初始透射率为 $30\%$ 。实验结果表明，采用第一种复

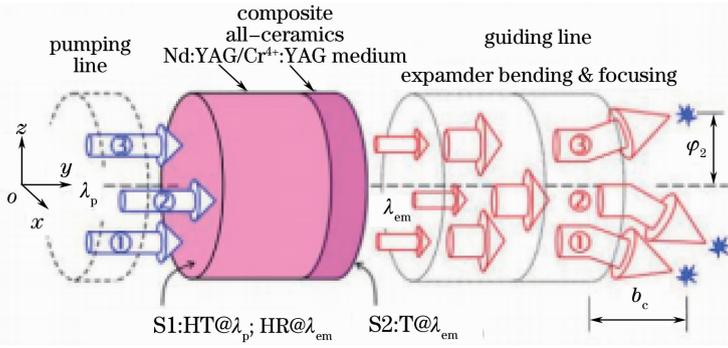


图 19 复合全陶瓷 Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG 被动调 Q 三光束输出激光器

Fig. 19 Passively Q-switched, all-ceramics, composite, Nd:YAG-Cr<sup>3+</sup>:YAG monolithic laser with three-beam output

表 1 基于 Nd:YAG 复合材料的被动调 Q 固体激光器

Table 1 Passively Q-switched solid-state lasers based on Nd:YAG composite materials

Year	Composite materials	Pump power /W	Output power /mW	Efficiency /%	Energy / $\mu$ J	Repetition rate /kHz	FWHM /ns	Peak power /kW	Reference
1999	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite crystal	1	—	—	14	—	0.4	30	[8]
2000	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite crystal	1.2	55	5	5.5	10	0.218	25	[9]
2003	Cr <sup>3+</sup> :YAG-Nd:YAG combined single crystal	1	18	1.8	1.8	10	10	0.18	[10]
2007	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite crystal	6	690	11.5	—	—	8.6	—	[11]
2010	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite crystal	1.66	68	4.1	8.7	8	0.876	8.3	[13]
2001	YAG-Nd:YAG composite crystal	18.6	2600	1.4	272	956	16.8	16.2	[16]
2003	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite crystal	9	2000	22.2	54	37	5.6	9.7	[3]
2004	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite crystal	7.7	2200	28	40	52	11	3.6	[17]
2005	YAG-Nd:YAG-YAG composite crystal	16.5	600	3.6	14.3	42	570	0.025	[19]
2007	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite crystal	20	4750	23.8	526.8	9	12	43.9	[21]
2007	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite crystal	0.43	28	6.5	2.8	10	2	1.4	[22]
2008	Nd:YAG-Cr:YAG composite crystal	3.3	592	18	39	16.3	6	6.5	[23]
2009	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite crystal	11.8	1150	10	67.3	17.1	2.05	32.8	[24]
2010	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite crystal	—	20	—	2000	0.01	14	143	[25]
2011	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite crystal	7.2	110	1.5	5.6	19.6	23.9	0.23	[26]
2011	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite crystal	2.75	365	13.3	25	14.6	1.7	14	[28]
2011	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite ceramic	—	—	—	2400	—	0.005	2800	[29]
2012	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite ceramic	—	—	—	2500	—	1.3	1900	[30]
2012	Nd:YAG-Cr <sup>3+</sup> :YAG composite ceramic	—	2750	—	11000	0.25	0.86	12800	[31]

合陶瓷,产生的  $1.06 \mu\text{m}$  的脉冲激光的脉冲能量为  $2.5 \text{ mJ}$ 、峰值功率为  $1.9 \text{ MW}$ 。在室温条件下,以此激光器作为抽运源,利用 LBO 晶体作为非线性倍频晶体获得了波长为  $532 \text{ nm}$  的绿光激光输出,输出的绿光激光的脉冲能量为  $0.36 \text{ mJ}$ 、峰值功率为  $0.3 \text{ MW}$ ,能量转换效率为  $27\%$ 。采用第二种复合陶瓷,在相同的 LD 抽运条件下,获得了脉冲能量为  $11 \text{ mJ}$ 、脉冲宽度为  $860 \text{ ps}$ 、峰值功率为  $12.8 \text{ MW}$  的  $1064 \text{ nm}$  激光脉冲输出,激光脉冲的重复频率为  $250 \text{ Hz}$ 。该激光脉冲可以在主控振荡功率放大器(MOPA)系统中进一步放大,因此可用作光学参数振荡器(OPO)系统的抽运源<sup>[30, 31]</sup>。表 1 给出了基于 Nd:YAG 复合材料的被动调 Q 固体激光器的研究进展。从表中可以看出,尽管采用 Nd:YAG 复合材料可以获得高功率的激光脉冲,但是激光器的转换效率相对较低。

由于纳秒量级脉冲宽度、高重复频率的全固态绿光激光器在信息存储、相干通信和医疗等领域具有重大的应用价值,LD 抽运的腔内倍频或者腔外倍频的基于 Nd 离子掺杂激光材料的被动调 Q 激光器是产生绿光激光光源的一个重要手段。

2009 年, Yang 等<sup>[32]</sup> 报道了紧凑型 LD 抽运 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体被动调 Q 腔内倍频激光器。激光实验装置如图 20 所示。所采用的 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体中 Nd:YAG 晶体的尺寸为  $4.5 \mu\text{m} \times 4.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , Nd 离子的掺杂浓度为  $1\%$ ; Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的尺寸为  $4.5 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 初始透射率为  $76\%$ 。在  $808 \text{ nm}$  LD 入射抽运光功率为  $14 \text{ W}$  时,获得了最大平均输出功率为  $0.5 \text{ W}$  的  $532 \text{ nm}$  脉冲绿光激光输出,光-光转换效率为  $3.5\%$ 。  $532 \text{ nm}$  绿光激光脉冲的重复频率为  $27.5 \text{ kHz}$ 、最小脉冲宽度为  $3.5 \text{ ns}$ 、脉冲能量为  $18 \mu\text{J}$ , 峰值功率为  $5.3 \text{ kW}$ 。

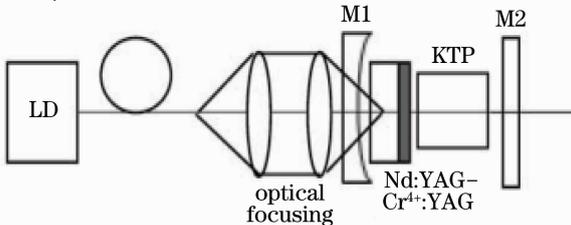


图 20 LD 抽运的 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体被动调 Q 腔内倍频激光器

Fig. 20 Compact passively Q-switched intra-cavity frequency doubled Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG composite crystal green laser

2011 年, Yang 等<sup>[33]</sup> 通过进一步调整 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体中 Nd:YAG 晶体的厚度与 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的掺杂浓度和厚度,采用 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体作为工作物质,通过腔外倍频的方式获得了脉冲宽度为  $1.3 \text{ ns}$  的被动调 Q 绿光激光输出。实验装置如图 21 所示。实验采用  $808 \text{ nm}$  的 LD 作为抽运源。复合 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体中, Nd:YAG 晶体的尺寸为  $4.5 \text{ mm} \times 4.5 \mu\text{m} \times 2 \text{ mm}$ , Nd 离子掺杂浓度为  $1\%$ ; Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的尺寸为  $4.5 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm} \times 0.75 \text{ mm}$ , 初始透射率为  $76\%$ 。激光器的腔长为  $2.75 \text{ mm}$ 。腔外倍频晶体 KTP 的尺寸为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ 。在入射抽运光功率为  $14 \text{ W}$  时,获得了  $532 \text{ nm}$  绿光的最短脉冲宽度为  $1.3 \text{ ns}$ , 平均输出功率为  $0.6 \text{ W}$ , 光-光转换效率为  $4.2\%$ , 重复频率为  $68.0 \text{ kHz}$ , 脉冲能量为  $8.8 \mu\text{J}$ , 峰值功率为  $6.7 \text{ kW}$ 。研究表明通过缩短激光器的腔长可以有效地压缩激光脉冲的脉冲宽度,提升脉冲的峰值功率,同时可以有效地降低激光腔的衍射损耗,提高激光器的效率。因此在设计基于 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合激光晶体的被动调 Q 激光器时,应考虑到 Nd:YAG 晶体对抽运光的有效吸收,并应采用薄的掺杂浓度高的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体作为可饱和吸收体,以获得高效、短脉冲、高功率激光脉冲输出。

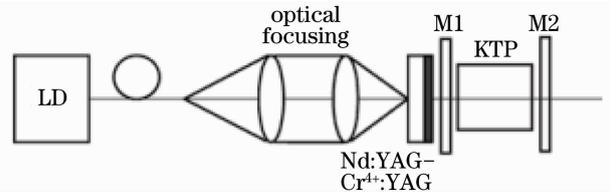


图 21 复合 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体被动调 Q 微片绿光激光器

Fig. 21 Compact Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG composite crystal passively Q-switched microchip green laser

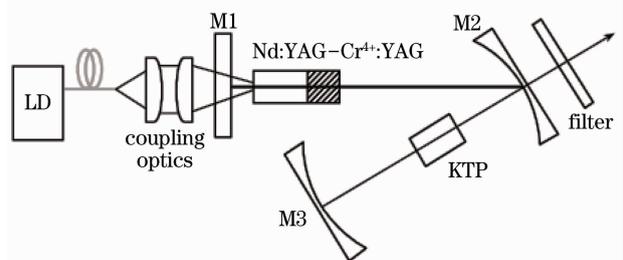


图 22 LD 抽运的 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体 V 型腔被动调 Q 532 nm 绿光激光器

Fig. 22 High-power passively Q-switched 532 nm green laser by using Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG composite crystal

2012年,Zhu等<sup>[34]</sup>报道了LD抽运的Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体V型腔被动调Q 532 nm绿光激光器,实验装置如图22所示。在入射抽运光功率为19.4 W的条件下,激光脉冲的平均输出功率为1.83 W,脉冲宽度为93.2 ns,重复频率为9.1 kHz,峰值功率为2.16 kW,光-光转换效率为9.4%。

2012年,Yang等<sup>[35]</sup>报道了LD端面抽运的Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体构成的激光器作为抽运源,抽运小型腔内OPO,实验装置如图23所示。输出信号可在1402~1676 nm之间进行调节。复合Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体中,Nd:YAG部分尺寸为4 mm×4 mm×2 mm,Nd离子掺杂浓度为1%,Cr<sup>4+</sup>:YAG部分尺寸为4 mm×4 mm×1.5 mm,初始透射率为76%。在LD抽运功率为14 W时,输出1534 nm激光的最大平均输出功率为600 mW,脉

冲宽度为2.0 ns,重复频率为16 kHz,峰值功率为18.7 kW,脉冲能量为37.5 μJ。表2给出了基于Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合材料的被动调Q全固态绿光激光器的研究进展。从表中可以看出,采用Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合材料可以获得峰值功率大于几千瓦的绿光激光脉冲,但是激光器的转换效率小于10%,有待进一步提升。

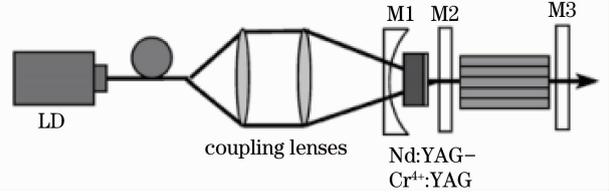


图23 周期极化铌酸锂OPO实验装置图  
Fig. 23 Experimental setup for PPLN OPO

表2 基于Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合材料的被动调Q全固态绿光激光器

Table 2 Passively Q-switched all-solid-state green lasers based on Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG composite materials

Year	Composite materials	Pump power /W	Output power /mW	Efficiency /%	Energy /μJ	Repetition rate /kHz	FWHM /ns	Peak power /kW	Reference
2009	Nd:YAG-Cr <sup>4+</sup> :YAG composite crystal	14	500	3.5	18	27.5	3.5	5.3	[32]
2011	Nd:YAG-Cr <sup>4+</sup> :YAG composite crystal	14	600	4.2	8.8	68.0	1.3	6.7	[33]
2012	Nd:YAG-Cr <sup>4+</sup> :YAG composite crystal	19.4	1830	9.4	201	9.1	93.2	2.16	[34]
2012	Nd:YAG-Cr <sup>4+</sup> :YAG composite crystal	14	600	4.3	37.5	16	2.0	18.7	[35]

### 3 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合材料被动调Q固体激光器的研究进展

相对于Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG被动调Q激光器的研究工作及所取得的丰富研究成果而言,Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG被动调Q的微片激光器研究工作的进展略显缓慢。2001年Dong等<sup>[36]</sup>首次实现了Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体对Yb:YAG晶体的被动调Q激光输出,但激光

的效率很低。2003年Wu等<sup>[37]</sup>采用Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体同时作为可饱和吸收体和输出耦合镜实现了微片Yb:YAG被动调Q激光输出,获得了脉冲能量为1.7 μJ、脉冲宽度为15 ns、峰值功率为110 W的被动调Q激光脉冲输出。2005年Zhang等<sup>[38]</sup>在Cr<sup>4+</sup>:YAG被动调Q Yb:GGG激光器中获得脉冲宽度为24~29 ns,脉冲能量为45~104 μJ,重复率为2~11 kHz的激光输出。2006年Dong等<sup>[39]</sup>在

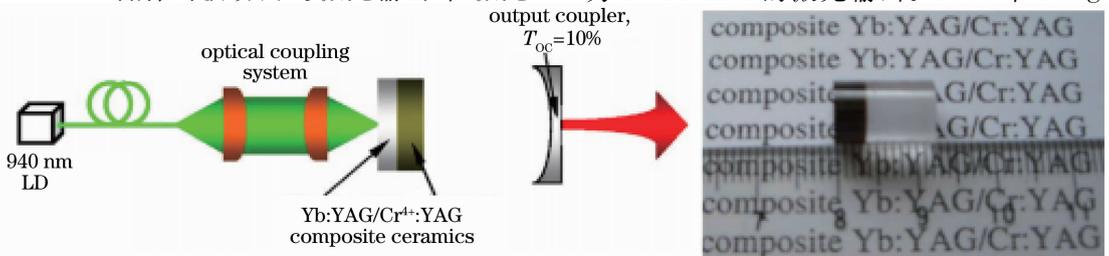


图24 (a) LD抽运的Yb:YAG-Cr:YAG复合陶瓷自调Q激光器;(b)复合Yb:YAG-Cr:YAG陶瓷结构示意图  
Fig. 24 (a) LD-pumped Yb:YAG-Cr:YAG composite ceramic self-Q-switched laser;(b) photograph of composite Yb:YAG-Cr:YAG ceramics

Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调Q 微片激光器中获得了光-光转化效率高达27%、脉冲宽度为480 ps、峰值功率高达27 kW的调Q脉冲激光输出。2007年Dong等<sup>[40]</sup>在分立式Yb:LuAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG微片激光器中首次获得了光-光转换效率高达40%、脉冲宽度为610 ps的脉冲激光输出。2007年Dong等<sup>[41]</sup>首次报道了分立式全陶瓷Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG被动调Q微片激光器,获得了光-光转换效率为30%、脉冲宽度为380 ps、脉冲能量为31 μJ、峰值功率超过82 kW的激光输出。2007年,Dong等<sup>[42]</sup>采用真空烧结技术和纳米晶体技术制备的Yb:YAG-Cr:YAG复合陶瓷作为工作物质,首次实现了Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合陶瓷的被动调Q激光输出。激光工作物质Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合陶瓷中,Yb:YAG陶瓷的尺寸为φ8 mm×1.5 mm,Yb离子的掺杂浓度为9.8%;Cr:YAG陶瓷的尺寸为φ8 mm×2 mm,Cr离子的掺杂浓度为0.1%,初始透射率为64%。图24给出了LD抽运Yb:YAG-Cr:YAG复合陶瓷被动调Q激光器的实验装置图及所用Yb:YAG-Cr:YAG复合陶瓷的照片。获得了脉冲能量为125 μJ,峰值功率超过105 kW,脉冲宽度为1.2 ns,重复频率为3.8 kHz, $M^2 < 1.35$ 的近衍射极限的脉冲激光输出,斜率效率为27%。

随后,Dong等<sup>[43]</sup>在采用平-凹腔获得Yb:YAG-Cr:YAG复合陶瓷被动调Q激光输出的基础上,进一步优化Yb:YAG-Cr:YAG复合陶瓷中Yb:YAG陶瓷及Cr:YAG陶瓷的厚度参数,采用Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合陶瓷作为工作物质,首次研制成功了LD抽运的亚纳秒量级Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG复合陶瓷被动调Q微片激光器,并获得了高效的激光输出。激光实验采用如图25所示实验装置。用于研制Yb:YAG-Cr:YAG微片激光器的Yb:YAG-Cr:YAG复合陶瓷中,Yb:YAG陶瓷的厚度调整为

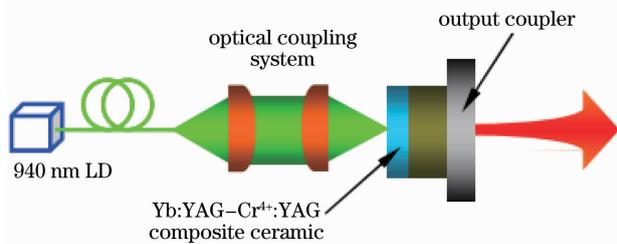


图 25 LD 端面抽运的复合 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 全陶瓷皮秒量级自调 Q 微片激光器

Fig. 25 LD end-pumped all-ceramic composite Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG self-Q-switched microchip laser

1.2 mm,Yb<sup>3+</sup>离子的掺杂浓度为9.8%,Cr:YAG的厚度调整为1.5 mm,Cr离子的掺杂浓度为0.1%,对波长为1030 nm的激光的初始透射率约为70%。因此整个微片激光器的腔长约为2.7 mm。通过实验,获得了脉冲宽度为237 ps,重复频率为3.5 kHz,脉冲能量为172 μJ,峰值功率超过0.72 MW,斜率效率高达29%,光束质量因子 $M^2 < 1.09$ 的接近衍射极限的高光束质量激光脉冲输出。这是国际上报道的有关被动调Q Yb:YAG激光器的最好研究成果。在研究过程中发现复合激光陶瓷比通过光胶合技术形成的复合晶体更具有优势:其一是通过陶瓷烧结技术非常方便地可以实现多功能复合陶瓷;其二是两种陶瓷的结合面的强度比复合晶体的要高。与用Cr<sup>4+</sup>:YAG被动调Q的Yb:YAG激光器相比,复合Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG激光陶瓷不仅具有整体化集成化的优点,而且通过把激光工作部位和被动调Q部位的结合,消除了传统被动调Q激光器中存在的在高峰值功率运行的情况下容易在两者界面之间发生空气击穿的问题,同时还减少了激光腔的损耗。

2008年,Cai等<sup>[44]</sup>报道了970 nm的LD抽运的复合Yb:YAG-YAG陶瓷薄片激光器。采用图26所示实验装置,增益介质为复合Yb:YAG-YAG陶瓷薄片,Yb:YAG部分厚0.6 mm,Yb离子的掺杂浓度为9.8%,YAG部分厚2.5 mm,分别在连续波和声光调Q两种模式下进行激光振荡。在连续波模式下,当抽运光功率为20 W,输出耦合镜透射率为2%时,获得了中心波长为1031 nm,最大功率为1.05 W的激光输出,光-光效率为5.25%;在声光调Q模式下,获得了最小脉冲宽度为166 ns,最大峰值功率为2.6 kW的激光脉冲输出,平均输出功率为0.44 W,重

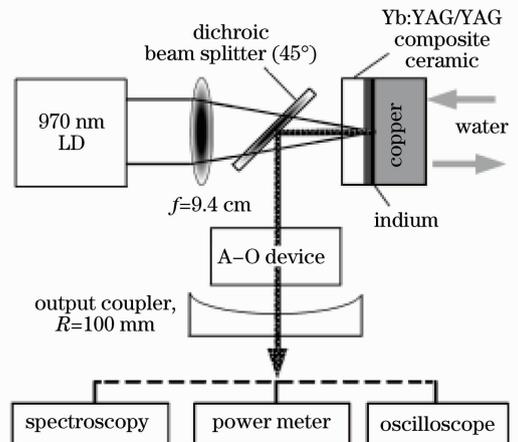


图 26 LD 抽运的复合 Yb:YAG-YAG 陶瓷薄片激光器  
Fig. 26 Yb:YAG-YAG composite thin disk ceramic laser pumped with 970 nm laser diode

复频率为 1 kHz。

2011 年, Ma 等<sup>[45]</sup>用数值模拟的方法系统地研究了 LD 端面抽运的 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合陶瓷被动调 Q 激光器的激光性能。通过解瞬态方程, 研究了输出耦合镜反射率、Cr<sup>4+</sup>:YAG 的厚度与掺杂浓度和抽运光束腰斑半径对激光性能的影响。研究表明, 要获得较高的脉冲能量, 应选用较低反射率的输出耦合镜和较低初始透射率的可饱和吸收体。要获得高的峰值功率和更高的效率, 应选用更薄、Cr 离子掺杂浓度更高的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 陶瓷和合适反射率的输出耦合镜。对 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合陶瓷激光性能的理论优化模拟有助于设计高效、高功率输出的基于 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料的微片激光器, 为该种新型微片激光器在激光点火、激光加工、非线性倍频产生新型激光光源等的应用奠定了理论基础, 具有实际的指导意义。

2012 年, Sulc 等<sup>[46]</sup>报道了 968 nm LD 抽运的 Yb:YAG-Cr:YAG 复合晶体被动调 Q 激光器的研究结果。采用扩散键合技术制备的 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体作为激光工作物质。复合晶体的直径为 3 mm, Yb:YAG 部分和 Cr<sup>4+</sup>:YAG 部分的长度分别为 3 mm 和 1.6 mm, Yb<sup>3+</sup> 离子的掺杂浓度为 10%, Cr<sup>4+</sup>:YAG 的初始透射率为 85%。在实验过程中, Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体采用水冷的方

式固定在 18 °C。Yb:YAG-Cr:YAG 复合晶体的激光性能研究是采用微片和长腔两种激光器腔型进行的。对微片激光器而言, 输出耦合镜对 1031 nm 的激光反射率为 85%, 获得了脉冲宽度为 140 ps, 脉冲能量为 0.13 mJ, 峰值功率为 0.92 MW 的脉冲激光输出。但由于腔内的光强太强, 激光晶体的表面出现明显的损伤, 导致激光器不能稳定运行。对长腔激光器而言, 输出耦合镜对 1031 nm 的激光反射率为 70%, 获得的激光脉冲的宽度为 17 ns, 峰值功率为 23 kW, 脉冲能量为 0.38 mJ 的脉冲激光输出, 但是激光器的效率低下, 只有 5%。因此就如何采用 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体实现高功率激光输出还有许多关键问题亟待解决, 比如由于 Yb:YAG 宽的发射带导致的多纵模激光振荡引起的输出脉冲的不稳定性, 激光镀膜及激光晶体损伤的问题等。表 3 给出了基于 Yb:YAG 复合材料的被动调 Q 激光器的研究进展。从表中可以看出, 采用 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料可以同时实现峰值功率接近兆瓦量级和转换效率接受 20% 的脉冲激光。因此通过优化复合材料的掺杂浓度和厚度等参数, 基于 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料的被动调 Q 激光器是实现峰值功率大于兆瓦量级、光-光转换效率大于 15% 的非常有潜力的、小型化和集成化的固体激光器。

表 3 基于 Yb:YAG 复合材料的被动调 Q 固体激光器

Table 3 Passively Q-switched solid-state lasers based on Yb:YAG composite materials

Year	Composite materials	Pump power /mW	Output power /mW	Efficiency /%	Energy /μJ	Repetition rate /kHz	FWHM /ns	Peak power /kW	Reference
2007	Yb:YAG-Cr <sup>4+</sup> :YAG composite ceramic	2550	475	19	125	3.8	1.2	105	[42]
2007	Yb:YAG-Cr <sup>4+</sup> :YAG composite ceramic	3280	610	19	172	3.5	0.237	720	[43]
2008	Yb:YAG-YAG composite ceramic	—	440	—	432	1	166	2.6	[44]
2012	Yb:YAG-Cr <sup>4+</sup> :YAG composite crystal	—	—	5	130	—	0.14	920	[46]

## 4 结束语

LD 抽运的被动调 Q 固体激光器因其结构简单、稳定性好、效率高等优点, 在光通信、环境监测、材料加工、医疗和非线性光学等领域具有重大的应用价值。相对于机械接触固定分离式的激光增益介质和可饱和吸收体所构成的被动调 Q 激光材料而言, 采用扩散键合技术或真空烧结技术制备的复合材料具有明显的优势, 不仅进一步减少激光腔的损耗, 而且消

除了激光增益介质和可饱和吸收体之间的空气间隙, 避免在高峰功率运行下产生等离子体导致空气击穿致使激光镀膜和激光晶体的损伤。相对于双掺自调 Q 激光材料而言, 复合激光材料可有效地减少热透镜效应, 改善输出激光的光束质量, 增加转换效率, 并且可分别对增益介质和可饱和吸收体进行参数优化。目前基于 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合激光晶体的被动调 Q 激光器的研究取得了长足的进展, 获得峰值功率

高达兆瓦量级的激光脉冲输出,但激光器的光-光转换效率偏低,还亟待通过优化设计 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合激光材料及抽运参数来进一步加以提升。相对于 Nd:YAG 激光材料, Yb:YAG 激光材料凸显出了明显的优势,但和基于 Nd:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料的被动调 Q 激光器丰富的理论和应用研究成果相比,基于 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料的被动调 Q 激光器研究总体水平还处于理论和实验研究的起步阶段,存在明显的不足,有许多问题尚待深入探索,主要包括:1)有关 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料理论设计、Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 界面特性、Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料中 Yb:YAG、Cr<sup>4+</sup>:YAG 的厚度、Yb<sup>3+</sup>离子与 Cr<sup>4+</sup>离子浓度匹配关系等相关理论亟需深入研究和完善;2)已报道的 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料的浓度匹配单一,其他 Yb<sup>3+</sup>离子及 Cr<sup>4+</sup>离子浓度配比的 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料未见报道,优化浓度匹配关系的 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 体系有待进一步挖掘;3)热键合技术制备的 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料及其性能研究至今鲜有报道,而且在微片激光器中存在激光镀膜及晶体的损伤, Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体多纵模振荡导致的激光脉冲不稳定性机理的研究也是今后有关 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体被动调 Q 微片激光器发展的一个重要问题和关键技术;4)新型 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料被动调 Q 微片激光器尚未达到商用水平,需要进一步开展对 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料的制备工艺技术、界面性能及被动调 Q 微片激光技术等方面的研究,以拓展 Yb:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合材料被动调 Q 微片激光器的应用领域。

## 参 考 文 献

- 1 J. Dong, K. I. Ueda, H. Yagi *et al.*. Laser-diode pumped self-Q-switched microchip lasers[J]. *Opt. Rev.*, 2008, **15**(2): 57~74
- 2 H. Eilers, U. Hömmerich, S. M. Jacobsen *et al.*. Spectroscopy and dynamics of Cr<sup>4+</sup>:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> [J]. *Phys. Rev. B*, 1994, **49**(22): 15505~15513
- 3 R. Feldman, Y. Shimony, Z. Burshtein. Passive Q-switching in Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG monolithic microchip laser [J]. *Opt. Mater.*, 2003, **24**(1~2): 393~399
- 4 J. Dong, A. Shirakawa, K. Takaichi *et al.*. All-ceramic passively Q-switched Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG microchip laser[J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(20): 1154~1155
- 5 J. Dong, J. Li, S. Huang *et al.*. Multi-longitudinal-mode oscillation of self-Q-switched Cr, Yb:YAG laser with a plano-concave resonator[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **256**(1~3): 158~165
- 6 J. Dong, P. Deng, Y. Lu *et al.*. Laser-diode-pumped Cr<sup>4+</sup>, Nd<sup>3+</sup>:YAG with self-Q-switched laser output of 1.4 W[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(15): 1101~1103

- 7 J. Dong, A. Shirakawa, S. Huang *et al.*. Stable laser-diode pumped microchip sub-nanosecond Cr, Yb:YAG self-Q-switched laser[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2005, **2**(8): 387~391
- 8 J. J. Zayhowski. Microchip lasers [J]. *Opt. Mater.*, 1999, **11**(2~3): 255~267
- 9 J. J. Zayhowski. Passively Q-switched Nd:YAG microchip lasers and applications[J]. *J. Alloys Comp.*, 2000, **303~304**: 393~400
- 10 Chen Jun, Ge Jianhong, Zhou Tao *et al.*. LD pumped combined single crystal Cr<sup>4+</sup>:YAG-Nd<sup>3+</sup>:YAG self Q-switched laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6): 481~484  
陈军,葛剑虹,周涛等. LD抽运的Nd<sup>3+</sup>:YAG-Cr<sup>4+</sup>:YAG组合单晶自调Q激光器的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6): 481~484
- 11 Ding Zheng, Qi Wenzong, Yi Xuebin *et al.*. Theoretic study and experiments on thermally bonded Cr<sup>4+</sup>:YAG passively Q-switched lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(9): 1454~1458  
丁征,齐文宗,衣学斌等.热键合技术的Cr<sup>4+</sup>:YAG被动调Q激光器理论与实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(9): 1454~1458
- 12 H. Sakai, H. Kan, T. Taira. >1 MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched Nd<sup>3+</sup>:YAG microchip laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(24): 19891~19899
- 13 Liu Lei, Zhang Dayong, Zhao Hong *et al.*. A tightly coupled diode pumped microlaser with passive Q switch [J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(6): 609~612  
刘磊,张大勇,赵鸿等. LD紧耦合泵浦被动调Q微型激光器实验研究[J]. *激光与红外*, 2010, **40**(6): 609~612
- 14 F. Hanson. Improved laser performance at 946 and 473 nm from a composite Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> rod [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(26): 3549~3551
- 15 M. Armstrong, X. Zhu, J. Montgomery *et al.*. Novel composite structure Nd:YAG gain media for high power scaling of side pumped configurations [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **175**(1~3): 201~207
- 16 N. Pavel, J. Saikawa, S. Kurimura *et al.*. High average power diode end-pumped composite Nd:YAG laser passively Q-switched by Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber [J]. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1*, 2001, **40**(3A): 1253~1259
- 17 Y. Kalisky, L. Kravchik, M. R. Kokta. Performance of diode-end-pumped Cr<sup>4+</sup>, Nd<sup>3+</sup>:YAG self-Q-switched and Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG diffusion bonded lasers [J]. *Opt. Mater.*, 2004, **24**(4): 607~614
- 18 D. Kracht, M. Frede, R. Wilhelm *et al.*. Comparison of crystalline and ceramic composite Nd:YAG for high power diode end-pumping [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(16): 6212~6216
- 19 L. Zhang, D. Li, Q. Zhang *et al.*. Diode-pumped passive Q-switched and mode-locked 946 nm Nd:YAG laser with a Nd,Cr:YAG saturable absorber [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **250**(1~3): 174~177
- 20 H. Yagi, K. Takaichi, K. Hwada *et al.*. Side-pumped Nd<sup>3+</sup>:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> composite ceramic laser [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2006, **45**(4~7): L207~L209
- 21 C. Yin, L. Huang, M. Gong *et al.*. A novel compact side-pumped bonded slab microchip laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(8): 584~587
- 22 H. Lei, M. Gong, Y. Ping *et al.*. Repetition rate continuously controllable passively Q-switched Nd:YAG bonded microchip laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(8): 572~575
- 23 J. Miao, B. Wang, J. Peng *et al.*. Efficient diode-pumped passively Q-switched laser with Nd:YAG/Cr:YAG composite crystal [J]. *Opt. and Laser Technol.*, 2008, **40**(1): 137~141
- 24 H. X. Wang, X. Q. Yang, S. Zhao *et al.*. 2 ns-pulse, compact and reliable microchip lasers by Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG composite

- crystal[J]. *Laser Phys.*, 2009, **19**(8): 1824~1827
- 25 J. Tauer, H. Kofler, E. Wintner. Millijoule Q-switched Nd:YAG laser operating at 946 nm[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, **7**(4): 280~285
- 26 B. Zhang, N. Du, J. He *et al.*. 355-nm UV generation by intracavity frequency tripled passively Q-switched Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG laser[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2011, **23**(10): 612~614
- 27 Y. Ma, H. Li, J. Lin *et al.*. A thermally-insensitive passively Q-switched Cr<sup>4+</sup>:YAG/Nd:YAG laser[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2011, **43**(8): 1491~1494
- 28 J. Y. Meng, H. X. Wang. Single diode-pumped, 1.7 ns microchip laser by Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG composite crystal[J]. *Laser Phys.*, 2011, **21**(1): 79~81
- 29 N. Pavel, M. Tsunekane, T. Taira. Composite, all-ceramics, high-peak power Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG monolithic micro-laser with multiple-beam output for engine ignition[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(10): 9378~9384
- 30 G. Salamu, A. Ionescu, C. A. Brandus *et al.*. High-peak power, passively Q-switched, composite, all-poly-crystalline ceramics Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG laser and generation of 532-nm green light[J]. *Laser Phys.*, 2012, **22**(1): 68~73
- 31 O. Sandu, G. Salamu, N. Pavel *et al.*. High-peak power, passively Q-switched, composite, all-polycrystalline ceramic Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG lasers[J]. *Quantum Electron.*, 2012, **42**(3): 211~215
- 32 X. Q. Yang, H. X. Wang, J. L. He *et al.*. A compact passively Q-switched intra-cavity frequency doubled Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG composite crystal green laser[J]. *Laser Phys.*, 2009, **19**(10): 1964~1968
- 33 X. Q. Yang, H. X. Wang, J. F. Yang *et al.*. 1.3-ns pulse, compact passively Q-switched microchip green laser by Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG composite crystal[J]. *Laser Phys.*, 2011, **21**(4): 690~694
- 34 S. Q. Zhu, S. E. Wang, Z. Q. Chen *et al.*. High-power passively Q-switched 532 nm green laser by using Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG composite crystal[J]. *Laser Phys.*, 2012, **22**(6): 1011~1014
- 35 X. Q. Yang, J. F. Yang, B. T. Zhang *et al.*. A compact, widely tunable intracavity PPLN optical parameter oscillator driven by an Nd:YAG/Cr:YAG composite crystal laser[J]. *Laser Phys.*, 2012, **22**(3): 513~517
- 36 J. Dong, P. H. Deng, Y. P. Liu *et al.*. Passively Q-switched Yb:YAG laser with Cr<sup>4+</sup>:YAG as the saturable absorber[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(24): 4303~4307
- 37 H. Wu, P. Yan, M. Gong *et al.*. A passively Q-switched diode pumped Yb:YAG microchip laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(12): 697~698
- 38 X. Y. Zhang, A. Brenier, Q. P. Wang *et al.*. Passive Q-switching characteristics of Yb<sup>3+</sup>:Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> crystal[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7708~7719
- 39 J. Dong, A. Shirakawa, K. I. Ueda. Sub-nanosecond passively Q-switched Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG sandwiched microchip laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **85**(4): 513~518
- 40 J. Dong, K. Ueda, A. A. Kaminskii. Efficient passively Q-switched Yb:LuAG microchip laser[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(22): 3266~3268
- 41 J. Dong, A. Shirakawa, K. Takaichi *et al.*. All ceramic passively Q-switched Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG microchip laser[J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(20): 1154~1155
- 42 J. Dong, A. Shirakawa, K. Ueda *et al.*. Ytterbium and chromium doped composite Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramics self-Q-switched laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(19): 191106
- 43 J. Dong, K. Ueda, A. Shirakawa *et al.*. Composite Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG ceramics picosecond microchip lasers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(22): 14516~14523
- 44 H. Cai, J. Zhou, H. Zhao *et al.*. Continuous-wave and Q-switched performance of an Yb:YAG/YAG composite thin disk ceramic laser pumped with 970-nm laser diode[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(11): 852~854
- 45 J. Ma, J. Dong, K. i. Ueda *et al.*. Optimization of Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG composite ceramics passively Q-switched microchip lasers[J]. *Appl. Phys. B*, 2011, **105**(4): 749~760
- 46 J. Sule, T. Koutny, H. Jelinkova *et al.*. Yb:YAG/Cr:YAG composite crystal with external and microchip resonator[C]. *SPIE*, 2012, **8235**: 823522

栏目编辑: 张 腾