

# 基于被动调Q固体激光器的激光点火系统的研究进展

杨林 董俊

厦门大学信息科学与技术学院电子工程系, 福建 厦门 361005

**摘要** 稀薄燃烧是一种先进的燃烧方法,采用稀薄燃烧技术可以使发动机在减少废气排放的同时提高热效率。稀薄燃烧催发了激光点火技术的应用。最近几十年,脉冲宽度短、峰值功率高的被动调Q固体激光器得到了飞速的发展,特别是采用掺钕离子( $\text{Nd}^{3+}$ )和镱离子( $\text{Yb}^{3+}$ )的激光材料作为激光增益介质,用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为被动调Q开关的微片固体激光器在激光点火研究方面取得了长足的进展。系统地介绍了激光点火的机理和应用于激光点火的基于 $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 与 $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的被动调Q固体激光器的最新研究进展,以及两类被动调Q激光器在激光点火应用中的优缺点,并指出了 $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调Q微片激光器在激光点火应用中的优势、需解决的问题及发展方向。

**关键词** 激光器;被动调Q;激光点火; $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ;  $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.030007

## Progress in Laser Ignition Based on Passively Q-Switched Solid-State Lasers

Yang Lin Dong Jun

*Department of Electronics Engineering, School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China*

**Abstract** Laser ignition technology emerges as an advanced combustion method for engine. It can make the engine reduce waste gas emission and improve the thermal effect. Lean burning improves thermal efficiency and reduces exhaust emissions by laser ignition. In recent decades, short pulse, high peak power passively Q-switched solid-state lasers are developed rapidly for their potential applications in laser ignition. Especially the passively Q-switched lasers using neodymium ion ( $\text{Nd}^{3+}$ ) or ytterbium ion ( $\text{Yb}^{3+}$ ) doped materials as the laser gain media and  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  as the saturable absorber, make much progress in potential laser ignition applications. We overviewe the mechanism of laser ignition and progresses in passively Q-switched solid-state lasers based on  $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  and  $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ . And the advantages and disadvantages of these two types passively Q-switched lasers used in laser ignition are discussed systematically. The advantages of  $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  passively Q-switched microchip lasers used in laser ignition are addressed for future application in engine ignition. And the key issues for developing high peak power  $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  passively Q-switched microchip lasers are also addressed.

**Key words** lasers; passively Q-switched; laser ignition;  $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ;  $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

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

## 1 引言

基于内燃发动机驱动的汽车在给人们的生活带来方便的同时也极大地消耗了自然资源,同时汽车所排放的尾气也是环境污染的一个重要因素。这主要是由于汽车内燃机目前所采用的电火花塞自身有诸多缺陷,造成了燃料燃烧不充分。由于目前世界范围内能源紧缺和环境污染非常严重,因此如何高效利用有限资源以及如何减少环境污染成为当前各行各业必须考虑的问题。发动机稀薄混合气燃烧技术可以提高发动机的排放性能和燃料的经济性,能够有效缓解能源和环保问题<sup>[1]</sup>。然而,在稀薄燃烧的条件下发动机气缸

收稿日期: 2014-08-20; 收到修改稿日期: 2014-10-27; 网络出版日期: 2015-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(61275143),教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0669)

作者简介: 杨林(1990—),男,硕士研究生,主要从事被动调Q微片激光器的研究。E-mail: liny234@163.com

导师简介: 董俊(1970—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光材料及固体激光技术等方面的研究。

E-mail: jdong@xmu.edu.cn(通信联系人)

内压力低、温度低,燃料不易发生爆燃,通常要采用增压技术提高缸内燃料的压缩比从而提高热效率<sup>[2]</sup>,点火器很可能将面临高达 50 MPa 的高压与 4000 K 的高温<sup>[9]</sup>。在高压缩比的情况下必须采用高能点火,因为高能点火燃烧速度快,稀燃界限大,有利于火花核形成,但高能点火又会导致所需点火的电压增高,造成电极烧蚀,大幅度降低火花塞使用寿命<sup>[4-5]</sup>。

随着激光技术的发展和成熟,激光点火作为一种更清洁、更高效、更经济的新型点火技术越来越受到各国研究者的重视<sup>[3,6-9]</sup>。与传统的电火花点火技术相比,激光点火技术具有以下优点:1) 在气缸内可实现任意位置的点火等离子体,这有利于实现点火位置的优化;2) 由于没有电极,在形成火焰中心时不会有淬灭效应;3) 在低的燃烧温度下可以点燃各种混合燃料,降低了有害气体的排放,提高了效率;4) 容易维护;5) 可实现多点点火;6) 短的点火延时和燃烧时间等。要实现汽车引擎的激光点火,在正常的空气压力下,需要的激光强度为 100 GW/cm<sup>2</sup>,这就需要脉冲能量至少为 0.1 mJ、脉冲宽度低于 10 ns 的激光。这些可以通过激光二极管抽运的被动调 Q 固体激光器来实现,而且被动调 Q 固体激光器还具有小型化、结构紧凑、价格便宜、容易维护和使用寿命长等优点,因此激光二极管抽运的被动调 Q 固体激光器就成为汽车引擎激光点火的首选。最近日本、德国、英国等研究机构报道了用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 激光器替代内燃发动机火花塞点火的研究工作<sup>[10]</sup>,为小型化、集成化被动调 Q 微片激光器的研究注入了一股新的活力。特别是被动调 Q 微型固体激光器的迅速发展很可能使激光点火取代传统的点火方式应用于汽车发动机点火<sup>[11-13]</sup>。

针对基于被动调 Q 小型化、集成化固体激光器的激光点火技术在发动机点火方面的应用及存在的问题,本文系统地介绍了稀薄气体激光点火的原理,小型化集成化被动调 Q 激光器的研究进展,并详细地对比了 Nd<sup>3+</sup>掺杂的激光材料、Yb<sup>3+</sup>掺杂的激光材料在被动调 Q 激光器的研制中所取得的进展和优缺点,指出了小型化集成化被动调 Q 激光器用于激光点火存在的问题、解决方法和发展趋势。

## 2 激光点火系统

### 2.1 激光点火的原理

激光点火有 4 种不同的机制:热点火、光化学点火、非谐振击穿和谐振击穿<sup>[3,7,14]</sup>。

激光热点火主要指激光直接作用于燃料上,通过高温加热使反应物分子键断裂,形成高活性的自由基和原子,引发链式反应进而点燃燃料,一般用于固体推进剂点火。该种点火方式可以很容易点燃固体燃料,但对于气体燃料,激光诱导过程引起的热膨胀产生的光解和流体动力学因素会增大点火的复杂性。而且这种点火机制是通过提高目标分子动能的方法使分子化学键断裂而发生化学反应,没有空气击穿现象,会造成比较大的点火延迟,不适用于内燃发动机。

激光光化学点火不是对气体燃料直接加热,而是通过共振激光束的高能量多光子使气体分子分解,激发高活性的自由基与周围的混合气发生反应。当自由基的产生率高于复合率,这些高活性的自由基数量就会不断增加并达到阈值,实现点火。激光光化学点火需要激光波长与目标分子的吸收波长相匹配才能离解目标分子,对于燃料具有选择性。采用这种点火机制,大多数气体燃料需要紫外波段的激光才能离解。然而,目前紫外波段激光器的制造成本较高,因此可用于燃烧反应的紧凑型激光器还没有达到实用化。

非谐振击穿又称为激光诱导火花点火,是入射的激光束在混合气中聚焦于一点,通过非共振多光子电离和电子级联电离引发空气击穿<sup>[15]</sup>。非共振多光子电离是指气体分子或原子同时吸收足够数量的光子而引起电离。光子吸收过程诱导价电子跃迁到导带成为分子或原子系统的自由电子,自由电子的数量呈指数增长,直到局部电场电势超过气体的击穿电势。Weinrotter 等<sup>[7]</sup>提出在产生等离子体的过程中,占主导地位的是电子级联电离机制。在电子级联电离过程中,聚焦区域的初始电子通过逆轭致辐射过程从激光中吸收光子,当电子获得足够的能量就会撞击其他气体分子使其电离,造成电子级联电离反应并引起击穿。混合气分子通过非谐振击穿形成大量在高温高压下具有高反应能力的等离子体核。等离子体核向外膨胀形成冲击波,向周边释放光、热和激波,形成高活性的化学反应区诱导全尺度的燃烧,实现点火<sup>[16]</sup>。由于容易实现且可以自由选择合适波长的激光,非谐振击穿是激光点火中最常用的方法,研究人员对其的研究也较为深入。通常选用脉宽为纳秒级的调 Q 激光器,并将光斑聚焦到微米量级,便能提供点火所需的激光能量。

Forch 等<sup>[17-18]</sup>最先报道了谐振击穿机制。点火过程中,首先由气体分子的非谐振多光子电离过程释放出

原子,然后由谐振特性电离这些原子,这个过程会产生足够的电子实现空气击穿。与非谐振击穿相比,谐振击穿的效率更高,在谐振激光点火过程中,大部分激光脉冲能量都用来加热等离子体。但是,目前能实现谐振激光点火的激光系统结构十分复杂,价格高昂,不能满足内燃发动机激光点火的要求。因此,研发新型的小型集成化高峰值功率固体激光器就成为目前亟待解决的一个关键问题。

## 2.2 激光点火系统的结构

激光点火系统由激光器、传导光纤、聚焦透镜、耦合系统等组成。

高峰值功率且可靠的激光光源是激光点火系统最重要的组成部分。激光点火对激光峰值功率要求较高,兆瓦级峰值功率的激光脉冲才能稳定产生等离子体或者“激光火花”。在众多种类的激光器中,采用激光二极管(LD)端面抽运的被动调Q小型化固体激光器由于具备诸多优点,最适合作为激光点火系统的激光光源。与闪光灯相比,使用LD作为固体激光器的抽运源能够增加激光系统的效率,延长系统使用寿命,改善光束质量,增大脉冲重复频率<sup>[19-20]</sup>。与其他抽运方式相比,端面抽运具有效率高、模式匹配好的优点。因此,采用光纤耦合的LD抽运的被动调Q固体激光器结构紧凑、耐用、成本低、效率高,在生物、医疗、通信、材料微结构分析及机械加工等领域都有非常广阔的应用前景<sup>[21-22]</sup>。研究发现,激光功率密度高于 $10^{10}$  W/cm<sup>2</sup>就能满足点火的可靠性<sup>[23]</sup>。经过几十年的理论与实验研究,被动调Q固体激光器的峰值功率已可以达到兆瓦量级,脉冲宽度可压缩到亚纳秒量级,完全能够满足激光点火的功率要求。

对于激光光束到发动机燃烧室的传输,目前有两个最具可行性的方案:一是将激光器直接安装在气缸上,二是将激光器放置在与气缸分离的位置,借助光纤来传输激光。为了减少火花塞温度和积炭对点火的影响,增加发动机结构设计的灵活性,一般采用激光器设置在气缸外的结构。激光器产生的高功率密度激光通过光纤传输到气缸头,然后使用光学透镜来聚焦激光并耦合投射到燃烧室中。

耦合系统即光学窗口也是保证激光点火系统点火成功至关重要的组成部分,在成本控制中也起着重要作用<sup>[24]</sup>。激光点火系统的光学窗口需满足以下要求:能够承受发动机的机械应力与热应力,能够承受激光的高功率,具有自清洁能力。然而,目前市面上所提供的各种窗口材料的物理特性仍非常接近点火系统要求光学窗口应该达到的极限<sup>[25]</sup>。需要进一步的研究来提升光学窗口的性能。

除了研制高性能的激光器与高质量的光学元件外,研究者们也试图在激光点火系统的其他部分进行改进以提高系统的效率和稳定性。1999年,Morsy等<sup>[26]</sup>发现激光点火过程中,部分能量会穿过点火位置散射到燃烧室壁而损失,只有30%~70%的能量能被有效利用。他们提出用一个圆锥形空腔作为激光束收集器来提高激光点火系统的能量转化效率。图1给出了该系统的工作原理,一束未被聚焦的激光被直接引入到锥形腔内,部分瞬态激光能量被腔壁吸收,其余的能量被腔壁反射导向锥形腔的顶点,产生热电子。腔壁的多重反射产生沿腔体的中心轴线的聚焦效果,有效束缚住了几乎所有的入射能量。当沿锥形腔轴线的激光功率密度足够高时,就会实现空气击穿产生激光火花。

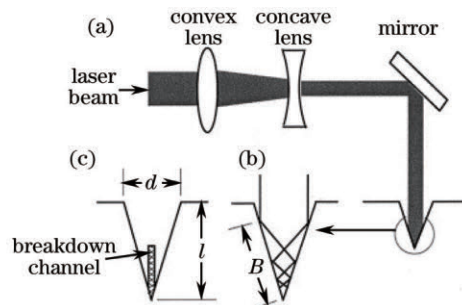


图1 采用圆锥形腔的激光点火系统。(a) 光学设置;(b) 锥形腔内多重反射原理;(c) 击穿通道的数值仿真模型

Fig.1 Laser-induced ignition using a conical cavity. (a) Optical arrangement; (b) principle of multiple reflection inside cavity; (c) model of break-down channel for numerical calculation

采用稀薄燃烧技术能够有效减少氮氧化物和二氧化碳等气体的排放,但Phuoc等<sup>[3,23]</sup>发现稀薄燃烧会导致火焰核膨胀的速度过低,从而显著降低了发动机的效率。特别是对于缸径大的发动机,由于火焰传播的距离长,该问题变得尤为严重。多点点火系统通过缩短点火过程中火焰传播的距离和燃烧时间,增大了气缸内的燃烧温度和气压,从而大大提高了发动机的热效率和输出功率。使用多点点火还能够避免点火早期

的火焰淬灭、哑火、压力脉冲以及循环变动等问题<sup>[3,14]</sup>,大大增加点火的可燃性。图2为内燃机中电火花塞点火方式及激光单点与多点点火方式示意图<sup>[27]</sup>。

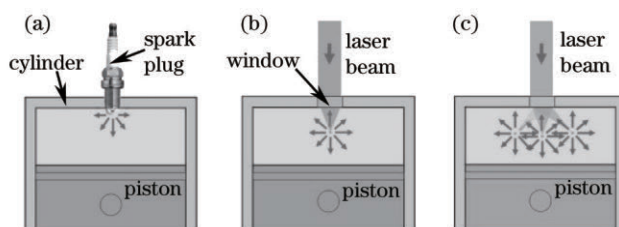


图2 (a) 电火花塞点火; (b) 激光单点点火; (c) 激光多点点火

Fig.2 Schematics of the combustion engines ignited. (a) Spark plug; (b) laser plug; (c) multipoint ignition

在基于锥形腔和激光多点点火的研究方面,2001年 Morsy 等<sup>[28]</sup>报道了激光两点点火系统。该系统在燃烧室外分别设置一个圆锥形腔和凸透镜,利用圆锥形腔的多重反射原理进行两点点火。实验采用甲烷-空气混合物燃料,空燃比为 1.8,燃烧室初始气压 150 kPa。研究表明,激光两点点火的火焰形成时间明显短于火花塞点火和激光单点腔内点火,且随初始气压增加愈加明显。另外,激光两点点火总燃烧时间比火花塞减少了 28%~45%。2005年 Weinrotter 等<sup>[29-30]</sup>在 Morsy 等的研究基础上提出了采用脉宽为 8 ns 的短脉冲 Nd:YAG 固体激光器的两点点火系统。该系统中由 Nd:YAG 激光器产生的激光被分束器分为功率相等的两部分,分别从燃烧室两侧通过凸透镜聚焦到燃烧室中进行两点点火。实验采用甲烷-氢气-空气混合物燃料,空燃比为 4.0,初始气压 400 kPa。研究表明,在两个点火点分离的情况下,燃烧室压力达到峰值的时间减少了 40%,压力峰值增加了 7%。

### 3 用于激光点火系统的被动调 Q 固体激光器的研究进展

#### 3.1 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 固体激光器

小型化、集成化的高峰值功率被动调 Q 激光器是激光点火系统的关键。在激光点火的研究中,Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 固体激光器首先得到了研究人员的关注。由于其高效率、低阈值、高增益、大功率、良好的热传导和热稳定性、高机械强度以及适用于多种工作方式(连续、脉冲、Q-开关、锁模)等优点,Nd:YAG 作为增益介质被广泛应用于被动调 Q 固体激光器。Geusic 等<sup>[31]</sup>在 1964 年便首次实现了 Nd:YAG 激光器连续振荡。1991 年 Andrauskas 等<sup>[32]</sup>提出 Cr<sup>4+</sup>:YAG 可以作为固体激光器的饱和和吸收被动调 Q 器件。Cr<sup>4+</sup>:YAG 在 900~1200 nm 波段具有宽的吸收带和可饱和吸收特性,与传统调 Q 材料相比具有基态吸收截面大、掺杂浓度高、导热性好、饱和光强小、损伤阈值高(500 MW/cm<sup>2</sup>)等优点,是高功率、高重复频率固体激光器理想的 Q-开关材料。随着激光器材料的品质和抽运技术等各方面的不断改进,用于激光点火系统的 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 固体激光器得到了持续发展。

1994 年, Zayhowski 等<sup>[33]</sup>首次将片状 Cr<sup>4+</sup>:YAG 键合到 Nd:YAG 上作为可饱和吸收体研制出了被动调 Q 微片激光器,得到能量为 11 μJ、脉冲宽度为 337 ps、重复频率为 6 kHz 的基模脉冲输出,峰值功率超过 28 kW。1997 年 Agnesi 等<sup>[34]</sup>研制出 LD 连续抽运 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 固体激光器,得到能量为 100 mJ、脉冲宽度为 36 ns、重复频率为 15 kHz 的脉冲输出。2007 年, Kofler 等<sup>[35]</sup>采用 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 激光器,由峰值功率为 300 W、脉冲宽度为 500 μs 的准连续 LD 端面抽运,实现了脉冲能量超过 6 mJ、脉冲宽度小于 1.5 ns 的 1064 nm 基模输出,在天然气混合燃料中成功产生了等离子体,取得了激光点火研究的重要突破。随后, Kofler 等<sup>[36]</sup>又在峰值功率为 225 W、脉冲宽度为 400 μs 抽运条件下将脉冲能量提高到 8 mJ,将脉冲宽度压缩到 1 ns。

为了提高固体激光器工作物质的热均匀性,保证输出激光的光束质量和激光效率,2008 年, Miao 等<sup>[37]</sup>报道了 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体被动调 Q 固体激光器。复合晶体由掺有激活离子的激光晶体和基质晶体通过无粘合剂的扩散技术结合而成,能够缓解激光材料的热透镜效应,易获得大尺寸的晶体,并且有益于实现激光系统的小型化。Miao 等采用的复合晶体中 Nd:YAG 晶体的尺寸为 φ 3 mm×7 mm,Nd<sup>3+</sup>的原子数分数为 1.0%,Cr:YAG 晶体的尺寸为 φ 3 mm×1 mm,初始透射率为 70%,激光器总腔长约为 32 mm。在 LD 抽

运功率为 3.3 W 时,得到最大平均输出功率为 592 mW,光-光转换效率为 18%,获得了脉冲宽度为 6 ns、脉冲能量为 38.5  $\mu\text{J}$ 、峰值功率为 6.5 kW 的激光输出。2009 年,Wang 等<sup>[38]</sup>利用 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合晶体被动调 Q 固体激光器在抽运功率为 11.8 W 的情况下得到了脉冲宽度为 2.05 ns、脉冲能量为 67.3  $\mu\text{J}$ 、峰值功率为 32.8 kW、重复频率为 17.1 kHz 的激光输出。所采用的复合晶体中 Nd:YAG 晶体的厚度和 Nd<sup>3+</sup>的原子数分数分别为 5 mm 和 1.0%,Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的厚度 2 mm,初始透射率为 76%。

2008 年,Sakai 等<sup>[39]</sup>采用 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 微片激光器获得了峰值功率为 1.2 MW 的激光脉冲输出,实验装置如图 3 所示。激光器由峰值功率为 26 W、重复频率为 100 Hz、脉冲宽度为 350  $\mu\text{s}$  的准连续 LD 抽运,获得了脉冲能量为 0.69 mJ、脉冲宽度为 580 ps 的激光输出。激光光束的光束质量因子  $M^2$  为 1.04,接近衍射极限。输出激光的光谱宽度小于 5.1 pm,亮度为 98 TW/(sr·cm<sup>2</sup>)。为了增加峰值功率,随后采用峰值功率为 29 W、重复频率为 100 Hz、脉冲宽度为 500  $\mu\text{s}$  的准连续 LD,实现了激光脉冲能量为 0.97 mJ、脉冲宽度为 460 ps 的激光输出,输出激光峰值功率达到了 2.1 MW。但输出激光的光束质量因子  $M^2$  有所升高,为 1.36,亮度也基本保持在 100 TW/(sr·cm<sup>2</sup>)。通过优化设计研制出了光纤耦合 LD 抽运的激光点火火花塞样机,如图 3(b)所示,为被动调 Q 激光器在激光点火中应用提供了雏形。

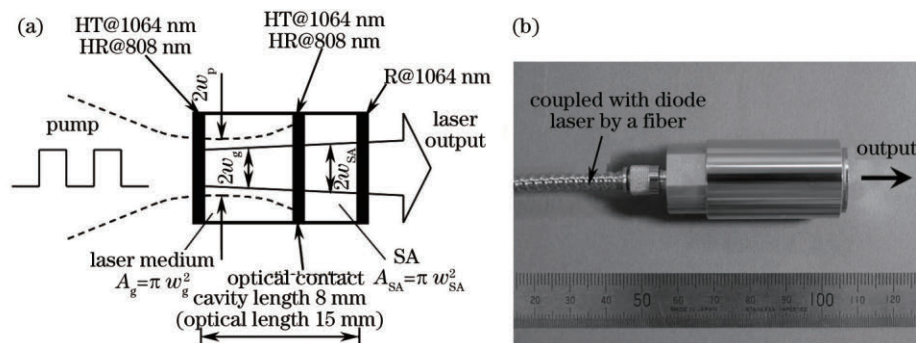


图 3 (a) LD 端面抽运被动调 Q 微片激光器模型; (b) 含有激光介质和可饱和吸收体的激光头,腔长和激光头模型尺寸分别为 8 mm 和  $\phi$  2 cm $\times$ 5 cm

Fig.3 (a) Model of a LD end-pumped passively Q-switched microchip laser; (b) optical head including a laser medium and saturable absorber, cavity length and module size are 8 mm and  $\phi$  2 cm $\times$ 5 cm, respectively

2008 年,Tsunekane 等<sup>[40]</sup>采用图 4 所示的实验装置在常温常压下成功进行了激光点火实验。其中 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 微型固体激光器腔长为 10 mm,由脉冲能量为 70 mJ、脉冲宽度为 500  $\mu\text{s}$  的准连续 LD 抽运,得到脉冲能量为 4 mJ、脉冲宽度为 0.6 ns、光-光转换效率为 23%、 $M^2$  为 1.2 的高光束质量激光输出。测得焦斑处激光亮度达 0.3 PW/(sr·cm<sup>2</sup>)。当激光输出的脉冲能量为 2.7 mJ 时,功率密度超过 5 TW/cm<sup>2</sup>,实现了空气击穿,获得了等离子体,如图 4(b)所示。随后,Tsunekane 等<sup>[41]</sup>在 20  $^{\circ}\text{C}$ ~150  $^{\circ}\text{C}$  的温度范围内对激光器进行了测试,发现激光器运行情况稳定,适用于发动机的点火环境。

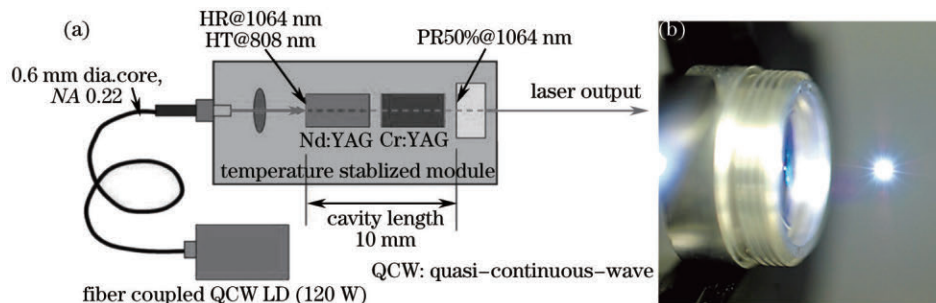


图 4 (a) 微型激光器模块结构示意图; (b) 激光器输出脉冲能量为 2.7 mJ 时实现空气击穿的照片  
Fig.4 (a) Structure of a micro-laser module; (b) photograph of breakdown in an air by a micro-laser with pulse energy of 2.7 mJ

2011 年,Bhandari 等<sup>[42]</sup>使用 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 微片激光器得到了峰值功率超过 6 MW 的 532 nm 线偏振激光输出。所采用的 Nd:YAG 晶体尺寸为  $\phi$  5 mm $\times$ 4 mm,原子数分数为 1.1%,Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的尺寸为  $\phi$  5 mm $\times$ 4 mm、初始透射率为 30%。实验采用脉冲宽度为 300  $\mu\text{s}$ 、峰值功率为 100 W、重复频率

为 100 Hz 的准连续 LD 端面抽运方式, 获得了脉冲能量为 3 mJ、脉冲宽度为 365 ps、 $M^2$  为 3.4、峰值功率高达 8.2 MW 的 1064 nm 线偏振激光输出。随后利用长度为 10 mm 的  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (LBO) 晶体进行倍频, 得到了脉冲能量为 1.7 mJ、脉冲宽度为 265 ps、峰值功率为 6.26 MW、 $M^2$  为 3 的 532 nm 绿光激光输出, 产生二次谐波的转换效率为 85%。

与单晶相比, 采用真空烧结技术和纳米晶体技术制备的激光陶瓷由于具有成本低、易获得高掺杂浓度、可制造大尺寸样品、可制备多功能复合材料以及可大规模生产的优点而在固体激光领域愈来愈受重视<sup>[43]</sup>。2011年, Pavel 等<sup>[44]</sup>使用准连续 LD 抽运 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合全陶瓷微片激光器实现了用于激光点火系统的两光束输出。Nd:YAG 陶瓷中 Nd<sup>3+</sup> 的原子数分数为 1.1%, 尺寸为  $\phi$  9 mm×8 mm, Cr<sup>4+</sup>:YAG 陶瓷尺寸为  $\phi$  9 mm×3 mm。该系统采用两束独立的抽运光束作为抽运源进行抽运, 在同一激光谐振腔中同时产生两束独立的激光输出。每束激光通过准直后用棱镜来改变传输方向, 最后聚焦到点火位置实现空气击穿。激光器由脉冲能量为 26.2 mJ 的准连续 LD 端面抽运, 得到两束脉冲能量为 2.5 mJ、脉冲宽度为 800 ns、峰值功率为 3.1 MW 的激光输出。随后 Pavel 等<sup>[45]</sup>又采用 3 根独立的光纤耦合的准连续 LD 作为抽运源, 实现了 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 复合全陶瓷微型激光器的三光束输出, 如图 5(a) 所示。所采用 Nd:YAG 与 Cr<sup>4+</sup>:YAG 陶瓷厚度分别调整到 7.5 mm 和 2.5 mm, 在抽运光重复频率为 5 Hz、脉冲能量为 26.7 mJ、脉冲宽度为 250  $\mu$ s 的条件下, 获得脉冲能量为 2.37 mJ、峰值功率为 2.8 MW、 $M^2$  为 3.7 的激光脉冲输出, 也成功实现了空气击穿。并且初步研制出了与电火花塞尺寸相当的激光点火光源, 如图 5(b) 所示, 为推动小型化被动调 Q 激光器在激光点火领域的应用奠定了坚实的基础。

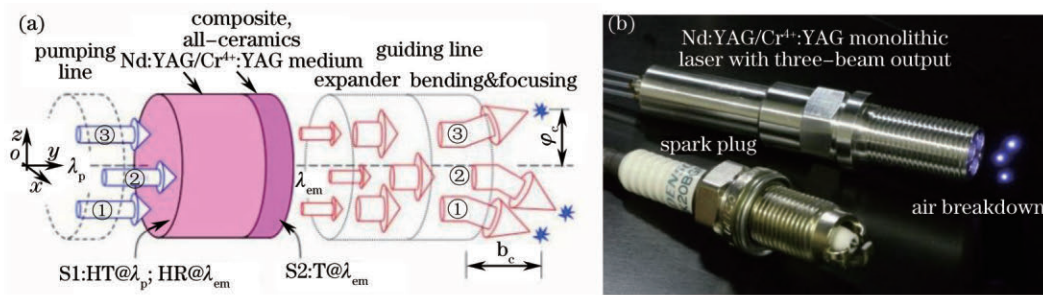


图 5 (a) 三光束输出的复合全陶瓷 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 激光器示意图; (b) 该激光器原型实现空气击穿的照片

Fig.5 (a) Schematic of a passively Q-switched, all-ceramics, composite, Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG monolithic laser with three-beam output; (b) photo of the prototype laser showing breakdown in the air

2012年, Sandu 等<sup>[46]</sup>报道了一种采用准连续 LD 抽运 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 全陶瓷激光器, 实验装置如图 6 所示。实验采用厚度为 7.2 mm、Nd<sup>3+</sup> 的原子数分数为 1.1% 的 Nd:YAG 陶瓷与厚度为 2.3 mm、初始透射率为 30% 的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的复合陶瓷, 利用重复频率为 2 Hz、脉冲宽度为 250  $\mu$ s 的准连续 LD 作为抽运源, 获得了脉冲宽度为 1.3 ns、脉冲能量为 2.5 mJ、峰值功率为 1.9 MW、 $M^2$  为 3.15 的激光输出。然后将该激光器作为抽运源, 在室温下利用 LBO 晶体作为非线性倍频晶体, 获得了脉冲能量为 0.36 mJ、峰值功率为 0.3 MW 的 532 nm 绿光激光输出, 转换效率为 27%。随后又采用厚度为 5.2 mm、Nd<sup>3+</sup> 的原子数分数为 1.5% 的 Nd:YAG 陶瓷, 经过主振荡功率放大系统(MOPA)放大, 获得了脉冲能量为 11 mJ、脉冲宽度为 860 ps、峰值功率为 12.8 MW、重复频率为 250 Hz 的 1064 nm 激光输出。

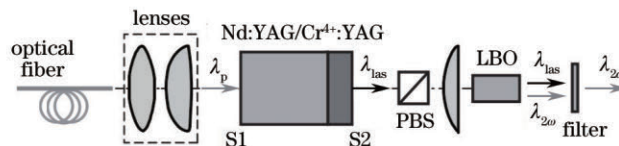


图 6 被动调 Q 复合全多晶陶瓷 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 激光器示意图

Fig.6 Scheme of a passively Q-switched, composite, all-polycrystalline ceramic Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG laser

### 3.2 Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 固体激光器

20 世纪 90 年代初, 发射波长在 900~1100 nm 的 InGaAs 激光二极管的出现使掺镱钇铝石榴石晶体(Yb:YAG)成为了固体激光器的研究热点<sup>[47]</sup>。Yb:YAG 晶体不仅拥有 YAG 基质材料本身优良的物理性质和稳定

的化学性质,而且与Nd:YAG晶体相比,荧光寿命更长、量子缺陷小、激光运行过程中的热负荷更小、吸收带宽更宽、适当的发射截面、可获得高浓度掺杂激光晶体<sup>[48-51]</sup>。因此,Yb:YAG晶体在小型化、集成化、高光学转换效率被动调Q激光器显示出更加突出的优势,基于Yb:YAG激光材料的小型化被动调Q激光器在激光点火领域更有前景。随着InGaAs激光二极管性能日趋成熟,大功率LD阵列对掺Yb<sup>3+</sup>材料的固体激光器提供了稳定的抽运源,可用于激光点火的基于Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG的固体激光器开始迅速发展。

2001年,Dong等<sup>[52]</sup>采用钛宝石激光器作为抽运源首次实现了Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG被动调Q激光输出,但由于实验条件的限制,所获得激光的转换效率较低。2007年,Dong等<sup>[53]</sup>对Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG分离式全陶瓷被动调Q激光器进行优化,通过缩短激光器的腔长压缩激光脉冲的宽度,获得了脉冲宽度为335 ps、重复频率为5 kHz、峰值功率超过150 kW、 $M^2$ 小于1.05的高质量激光脉冲输出,斜效率高达36%。2007年,Dong等<sup>[54]</sup>首次实现了Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG复合全陶瓷被动调Q激光输出。Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG复合陶瓷是通过激光陶瓷烧结技术制备的,其中Yb<sup>3+</sup>和Cr<sup>4+</sup>的原子数分数分别为9.8%和0.1%,Yb:YAG陶瓷和Cr<sup>4+</sup>:YAG陶瓷尺寸分别为 $\phi$ 8 mm $\times$ 1.5 mm和 $\phi$ 8 mm $\times$ 2 mm。利用两个焦距为8 mm的透镜将抽运光束聚焦到Yb:YAG的后表面,采用一个曲率为70 mm、对1030 nm激光透射率为10%的凹面镜作为输出耦合器,腔长为35 mm。获得了脉冲能量为125  $\mu$ J、脉冲宽度为1.2 ns、重复频率为3.8 kHz、峰值功率超过105 kW、 $M^2$ 小于1.35的激光输出。通过进一步优化Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG复合陶瓷的厚度参数(将Yb:YAG陶瓷和Cr<sup>4+</sup>:YAG陶瓷的厚度分别减小到1.2 mm和1.5 mm),Dong等<sup>[55]</sup>采用微片激光器的方式,实验装置如图7所示,在连续激光二极管的抽运下,获得了脉冲能量为172  $\mu$ J、脉冲宽度为237 ps、重复频率为3.5 kHz、峰值功率超过0.72 MW、 $M^2$ 小于1.09的激光脉冲输出。激光器的斜效率高达29%,未聚焦的激光峰值功率密度超过 $18.3 \times 10^9$  W/cm<sup>2</sup>。这是当时国际上首次利用Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG复合陶瓷材料实现了亚纳秒量级的激光脉冲输出,为小型化Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG被动调Q微片激光器在激光点火领域的应用提供了初步的研究结果。

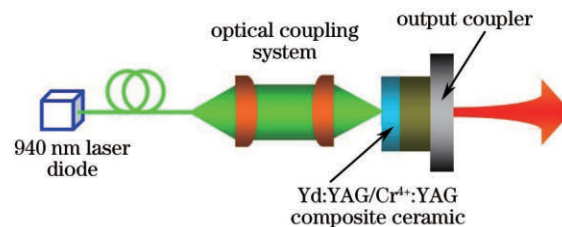


图7 采用Cr<sup>4+</sup>:YAG陶瓷作为可吸收饱和体的被动调Q Yb:YAG陶瓷微型激光器示意图

Fig.7 Schematic diagram of passively Q-switched Yb:YAG ceramic miniature laser with Cr<sup>4+</sup>:YAG ceramic as saturable absorber

为了获得更高的峰值功率,2012年,Tsunekane等<sup>[56]</sup>采用峰值功率为120 W的准连续LD作为抽运源对Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG激光器端面抽运,得到峰值功率为200 kW、脉冲能量为0.8 mJ、脉冲宽度为4 ns、 $M^2$ 小于1.1的高质量激光脉冲输出。实验装置如图8所示。所采用的Yb:YAG晶体厚度为4 mm,Yb<sup>3+</sup>掺杂原子数分

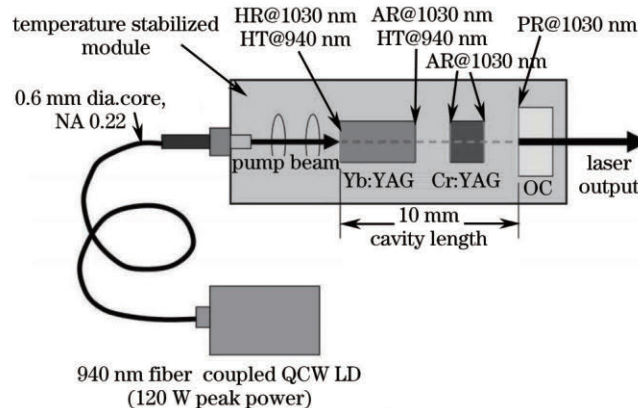


图8 准连续LD抽运的Yb:YAG/Cr:YAG被动调Q微片激光器示意图

Fig.8 Schematic diagram of a passively Q-switched Yb:YAG/Cr:YAG micro-laser module pumped by the QCW laser-diode

数为5.2%, Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体的初始透射率为95%,腔长为10 mm。随后Tsunekane等<sup>[57]</sup>对激光系统进行优化,将Yb:YAG晶体厚度调整到4.2 mm, Cr<sup>4+</sup>:YAG初始透射率调整为89%,获得了脉冲能量为3.6 mJ、脉冲宽度为1.3 ns、峰值功率为2.8 MW的激光脉冲输出。该高功率Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG被动调Q激光器的研制成功为激光火花塞的灵活设计提供了一种新型的激光光源。

2013年, Dong等<sup>[58]</sup>研制出了高效率的Cr<sup>4+</sup>:YAG被动调Q Yb:YAG微片激光器。所采用Yb:YAG晶体的厚度为1.2 mm, Yb<sup>3+</sup>的原子数分数为10%, Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体的厚度为1.5 mm, 对1030 nm激光的初始透射率为95%。激光器由高亮度单管LD端面抽运, 当吸收抽运功率为3.5 W时得到了平均输出功率为1.53 W的激光输出, 相应的光-光转换效率高达44%。实验获得了脉冲宽度为2.9 ns、脉冲能量为11.3 μJ、峰值功率为3.9 kW的高效激光输出。随后Dong等<sup>[59]</sup>进一步优化抽运条件, 利用焦距为11 mm的透镜来准直光纤耦合激光二极管的光束, 然后利用焦距为8 mm的透镜来聚焦实现紧聚焦抽运Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体获得被动调Q激光输出, 实验装置如图9所示。Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体中Yb:YAG晶体厚度和原子数分数分别为1.2 mm和10%, Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体的厚度为0.5 mm, 总腔长为70 mm。当吸收抽运功率为4.8 W时, 获得平均输出功率为1.75 W的被动调Q激光输出, 光-光转换效率达36%, 斜率效率达44%。实验中获得了脉冲宽度为3 ns、脉冲能量超过180 μJ、峰值功率超过60 kW、M<sup>2</sup>小于1.3的接近衍射极限的高质量高峰值功率激光脉冲输出。最近Dong等<sup>[60]</sup>利用Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体作为工作物质, 其中Yb:YAG晶体的厚度为1.2 mm、Yb<sup>3+</sup>离子的原子数分数为10%; Cr<sup>4+</sup>:YAG晶体的厚度为1 mm、初始透射率为70%, 在峰值功率为100 W、脉冲宽度为900 μs、重复频率为50 Hz的准连续激光二极管抽运下, 获得了单脉冲能量为1.6 mJ、脉冲宽度为1.46 ns、峰值功率为1.08 MW的被动调Q激光脉冲输出。在入射抽运光脉冲能量为86 mJ时获得了总能量为19 mJ的12个被动调Q激光脉冲输出, 相应的光-光转换效率为22%。

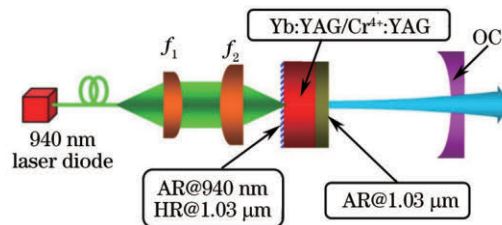


图9 LD抽运的Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体被动调Q激光器示意图

Fig.9 Schematic diagram of the LD pumped Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG composite crystal passively Q-switched laser

表1给出了采用连续激光二极管抽运的基于Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG和Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG的被动调Q固体激光器的研究进展, FWHM表示半峰全宽。由表中可以看出, 采用Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG复合陶瓷材料的激光器易获得较高峰值功率和脉冲能量的激光输出, 但是激光器的转换效率较低。而采用Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG材料的激光器能够得到相当高的能量转换效率, 甚至超过了40%, 同时激光输出的峰值功率也获得了大幅提高。

表1 连续LD抽运的基于Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG和Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG的被动调Q固体激光器

Table 1 Passively Q-switched solid-state lasers based on Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG and Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG pumped by CW LD

Year	Laser material	Pump power /W	Output power /W	Efficiency /%	Energy /mJ	Repetition rate /kHz	FWHM /ns	Peak power /MW	Ref.
1994	Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG single crystal	1.2	-	-	0.011	6	0.337	0.028	[33]
1997	Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG single crystal	9.5	1.5	16	0.1	15	36	0.0028	[34]
2008	Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG composite crystal	3.3	0.592	18	0.0385	16.3	6	0.0065	[37]
2009	Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG composite crystal	11.8	1.15	9.7	0.0673	17.1	2.05	0.0328	[38]
2007	Yb:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG separate ceramic	1.34	0.25	18.7	0.0513	5	0.335	0.15	[53]



续表 1

Year	Laser material	Pump power /W	Output power /W	Efficiency /%	Energy /mJ	Repetition rate /kHz	FWHM /ns	Peak power /MW	Ref.
2007	Yb:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG composite ceramic	2.55	0.48	18.8	0.125	3.8	1.2	0.105	[54]
2007	Yb:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG composite ceramic	3.28	0.61	18.6	0.172	3.5	0.237	0.72	[55]
2013	Yb:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG single crystal	3.5	1.53	44	0.0113	110.5	2.9	0.0039	[58]
2013	Yb:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG composite crystal	4.8	1.75	36	0.18	5.3	3	0.06	[59]

表 2 给出了采用准连续激光二极管抽运的基于 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 或 Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 的被动调 Q 固体激光器的研究进展。由表 2 可以看出,由于采用准连续激光二极管进行抽运有效抑制了激光材料的热效应,掺 Nd<sup>3+</sup>材料的固体激光器与掺 Yb<sup>3+</sup>材料的固体激光器所获得的脉冲能量和峰值功率都得到了显著提高,同时保证了高的光学转换效率,对于小型化集成化被动调 Q 激光器用于激光点火起到了积极的推动作用。

表 2 由准连续 LD 抽运的基于 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 或 Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 的被动调 Q 固体激光器

Table 2 Passively Q-switched solid-state lasers based on Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG or Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG pumped by QCW LD

Year	Laser material	Pump pulse energy / mJ	Pump repetition rate /Hz	Pump pulse duration / $\mu$ s	Efficiency /%	Energy / mJ	FWHM /ns	Peak power /MW	Ref.
2007	Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG single crystal	150	15	500	4	6	1.5	4	[35]
2007	Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG single crystal	90	-	400	8.9	8	1	8	[36]
2008	Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG single crystal	14.5	100	500	6.7	0.97	0.46	2.1	[39]
2008	Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG single crystal	17.5	-	500	23	4	0.6	6.7	[40]
2011	Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG single crystal	30	100	300	10	3	0.365	8.2	[42]
2011	Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG composite ceramic	26.2	5	250	9.5	2.5	0.8	3.1	[44]
2011	Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG composite ceramic	26.7	5	250	8.8	2.37	0.85	2.8	[45]
2012	Nd:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG composite ceramic	32	2	250	7.8	2.5	1.3	1.9	[46]
2012	Yb:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG single crystal	3.2	20	-	25	0.8	4	0.2	[56]
2013	Yb:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG single crystal	45	20	375	8	3.6	1.3	2.8	[57]
2014	Yb:YAG/Cr <sup>4+</sup> :YAG composite crystal	86	50	900	22	1.6	1.46	1.08	[60]

## 4 结 论

几十年来,研究人员在激光点火机制、点火系统结构及激光器等方面不断对激光点火进行探索,取得了长足的进展。为了提高激光点火系统的稳定性,研究人员提出了圆锥形腔结构和多点点火的方式,然而峰值功率高且可靠的激光器仍然是激光点火系统的关键。激光二极管抽运的被动调 Q 固体激光器由于结构

紧凑、稳定性好,在激光点火方面的应用体现出无可比拟的优势。利用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 作为可饱和吸收体的 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 固体激光器,特别是使用 $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 复合陶瓷材料作为工作物质的被动调 $Q$ 激光器,经过优化光学参数,输出脉冲的峰值功率可轻易达到兆瓦量级。尽管目前采用 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 材料的被动调 $Q$ 激光器的峰值功率不及基于掺 $\text{Nd}^{3+}$ 材料的被动调 $Q$ 激光器,但其能量转换效率非常高,能够有效降低激光器的能量消耗,对于有效利用能源及环境保护起到至关重要的作用。采用复合材料的微片式固体激光器由于独特的短腔结构,能够获得亚纳秒量级的脉冲激光输出,非常有利于激光器的小型化。采用合适参数的准连续激光二极管作为被动调 $Q$ 微片激光器的抽运源可以有效抑制激光工作物质的热效应,有益于掺 $\text{Yb}^{3+}$ 离子的激光材料在被动调 $Q$ 微片激光器中获得高功率的激光脉冲输出,为激光点火的应用提供了新型、高效的激光光源。目前采用准连续激光二极管作为抽运源,在 $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 复合晶体的被动调 $Q$ 激光器中获得峰值功率大于1.08 MW的激光脉冲输出,为进一步优化准连续激光二极管抽运的 $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 复合晶体被动调 $Q$ 微片激光器实现高功率激光输出奠定了坚实的基础。

尽管小型化、集成化被动调 $Q$ 固体激光器在激光点火中凸显出了无以伦比的优势和潜力,若要在实际中替换传统的电火花塞,仍然有许多问题亟待解决和深入研究。由于 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光材料本身固有的量子效率不高,大幅提升 $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 $Q$ 激光器的转换效率值得商榷。而基于 $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 复合激光材料的被动调 $Q$ 激光器在光学转化效率方面体现出明显的优势,而且准连续激光二极管抽运的 $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 复合材料被动调 $Q$ 激光器已获得峰值功率超过1 MW的激光脉冲输出。因此,通过优化设计 $\text{Yb}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 复合材料被动调 $Q$ 微片激光器的材料参数、抽运光参数,可望在小型化被动调 $Q$ 微片激光器中实现高效、高功率激光脉冲输出,为小型化被动调 $Q$ 激光器在激光点火中的应用提供一种价格便宜、经久耐用的固体激光光源。

#### 参考文献

- 1 A M K P Taylor. Science review of internal combustion engines[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(12): 4657-4667.
- 2 S Richardson, M H Mcmillian, S D Woodruff, *et al.* Misfire, knock and  $\text{NO}_x$  mapping of a laser spark ignited single cylinder lean burn natural gas engine[C]. *Society of Automotive Engineers*, 2004, 113: 858-865.
- 3 T X Phuoc. Laser-induced spark ignition fundamental and applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(5): 351-397.
- 4 J D Dale, M D Checkel, P R Smy. Application of high energy ignition systems to engines[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1997, 23(5-6): 379-398.
- 5 Shen Ruiqi, Ye Yinghua, Tu Jian. Effects of plasma and ablation on ignition processes of energetic materials under pulsed laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(11): 1323-1326.  
沈瑞琪, 叶迎华, 涂建. 激光等离子体和烧蚀对含能材料的激光点火过程的影响[J]. *中国激光*, 2004, 31(11): 1323-1326.
- 6 M H Morsy. Review and recent developments of laser ignition for internal combustion engines applications[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(7): 4849-4875.
- 7 M Weinrotter, D K Srivastava, K Iskra, *et al.* Laser ignition of engines—a realistic option[C]. *International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2005: High-Power Lasers and Applications*. 2006, 6053: 605316.
- 8 Wang Yuanli, Cheng Xiaobei. The applications of laser-induced spark ignition in the natural gas engine[J]. *Vehicle Engine*, 2007, 167(1): 2005-2008.  
汪源利, 成晓北. 激光点火在天然气发动机中的应用[J]. *车用发动机*, 2007, 167(1): 2005-2008.
- 9 Ling Ming, Huang Zhongrong, Zhang Jianwen. Development of laser ignition technology for gasoline engine[J]. *Internal Combustion Engines*. 2013, 164(3): 2011-2014.  
凌铭, 黄中荣, 张建文. 汽油内燃机激光点火技术进展[J]. *内燃机*, 2013, 164(3): 2011-2014.
- 10 Y K Voron'ko, K A Subbotin, V E Shukshin, *et al.* Growth and spectroscopic investigations of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped  $\text{NaGd}(\text{MoO}_4)_2$  and  $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2$ —new promising laser crystals[J]. *Opt Mater*, 2006, 29(2-3): 246-252.
- 11 H Kopecek, S Charareh, M Lackner, *et al.* Laser ignition of methane-air mixtures at high pressures and diagnostics[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the Asme*, 2005, 127(1): 213-219.
- 12 M H Morsy, S H Chung. Numerical simulation of front lobe formation in laser-induced spark ignition of  $\text{CH}_4/\text{air}$  mixtures[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(2): 1613-1619.

- 13 M Weinrotter, H Kopecek, E Wintner, *et al.*. Application of laser ignition to hydrogen-air mixtures at high pressures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2005, 30(3): 319-326.
- 14 P D Ronney. Laser versus conventional ignition of flames[J]. Opt Eng, 1994, 33(2): 510-521.
- 15 T X Phuoc, F P White. Laser-induced spark ignition of CH<sub>4</sub>/air mixtures[J]. Combustion and Flame, 1999, 119(3): 203-216.
- 16 Li Qiang, Wei Jianqin, Xu Cangsu. Phenomenological research of laser-induced spark ignition[J]. Vehicle Engine, 2011, 196(5): 2011-2015.
- 李 强, 魏建勤, 许沧粟. 激光诱导火花点火的现象学研究[J]. 车用发动机, 2011, 196(5): 2011-2015.
- 17 B E Forch, A W Miziolek. Oxygen-atom two-photon resonance effects in multiphoton photochemical ignition of premixed H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> flows[J]. Opt Lett, 1986, 11(3): 129-131.
- 18 B E Forch, A W Miziolek. Laser-based ignition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and D<sub>2</sub>O<sub>2</sub> premixed gases through resonant multiphoton excitation of H and D atoms near 243 nm[J]. Combustion and Flame, 1991, 85(1-2): 254-262.
- 19 T Y Fan, R L Byer. Diode laser-pumped solid-state lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(6): 895-912.
- 20 M Ross. YAG laser operation by semiconductor laser pumping[J]. Proceedings of the IEEE, 1968, 56(2): 196-197.
- 21 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.
- 22 J Dong, J Ma, Y Cheng, *et al.*. Comparative study on enhancement of self-Q-switched Cr,Yb:YAG lasers by bonding Yb:YAG ceramic and crystal[J]. Laser Phys Lett, 2011, 8(12): 845-852.
- 23 T X Phuoc. Single-point versus multi-point laser ignition: Experimental measurements of combustion times and pressures[J]. Combustion and Flame, 2000, 122(4): 508-510.
- 24 A M Starik, P S Kuleshov, N S Titova. Laser-initiated ignition of hydrogen-air mixtures[J]. Technical Physics, 2009, 54(3): 354-364.
- 25 G Herd, J Klaus, E Wintner, *et al.*. Laser ignition—a new concept to use and increase the potentials of gas engines[C]. ASME 2005 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference (ICEF 2005), 2005. 673-681.
- 26 M H Morsy, Y S Ko, S H Chung. Laser-induced ignition using a conical cavity in CH<sub>4</sub>-air mixtures[J]. Combustion and Flame, 1999, 119(4): 473-482.
- 27 M Tsunekane, T Inohara, A Ando, *et al.*. High peak power, passively Q-switched microlaser for ignition of engines[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(2): 277-284.
- 28 M H N Morsy, Y S Ko, S H Chung, *et al.*. Laser-induced two-point ignition of premixture with a single-shot laser[J]. Combustion and Flame, 2001, 124(4): 724-727.
- 29 M Weinrotter, H Kopecek, E Wintner. Laser ignition of engines[J]. Laser Phys, 2005, 15(7): 947-953.
- 30 M Weinrotter, H Kopecek, M Tesch, *et al.*. Laser ignition of ultra-lean methane/hydrogen/air mixtures at high temperature and pressure[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2005, 29(5): 569-577.
- 31 J E Geusic, H M Marcos, L G V Uitert. Laser oscillations in Nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets[J]. Appl Phys Lett, 1964, 4(10): 182-184.
- 32 D M Andrauskas, C Kennedy. Tetravalent chromium solid-state passive Q switch for Nd:YAG laser systems[C]. Advanced Solid State Lasers, 1991, 10: 393-397.
- 33 J J Zayhowski, C Dill. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers[J]. Opt Lett, 1994, 19(18): 1427-1429.
- 34 A Agnesi, S Dell'Acqua, G C Reali. 1.5 Watt passively Q-switched diode-pumped cw Nd:YAG laser[J]. Opt Commun, 1997, 133(1-6): 211-215.
- 35 H Kofler, J Tauer, G Tartar, *et al.*. An innovative solid-state laser for engine ignition[J]. Laser Phys Lett, 2007, 4(4): 322-327.
- 36 H Kofler, J Tauer, K Iskra, *et al.*. Development of a high peak power solid-state laser for engine ignition[C]. J Opt Soc of A, 2008, WB1.
- 37 J G Miao, B S Wang, J Y Peng, *et al.*. Efficient diode-pumped passively Q-switched laser with Nd:YAG/Cr:YAG composite crystal[J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40(1): 137-141.
- 38 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 Physics, 2009, 19(8): 1824-1827.
- 39 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.
- 40 M Tsunekane, T Taira. Compact, high peak power, passively Q-switched micro-laser for ignition of engines[C]. Lasers

- and Electro-Optics (CLEO), 2008. 1-2.
- 41 M Tsunekane, T Taira. High temperature operation of passively  $Q$ -switched, Cr:YAG/Nd:YAG micro-laser for ignition of engines[C]. Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2009. 1.
- 42 R Bhandari, T Taira. >6 MW peak power at 532 nm from passively  $Q$ -switched Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG microchip laser[J]. Opt Express, 2011, 19(20): 19135-19141.
- 43 J Dong, A Shirakawa, K Ueda, *et al.*. Efficient Yb<sup>3+</sup>:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramic microchip lasers[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89(9): 091114.
- 44 N Pavel, M Tsunekane, K Kanehara, *et al.*. Composite all-ceramics, passively  $Q$ -switched Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG monolithic micro-laser with two-beam output for multi-point ignition[C]. Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2011. 1-2.
- 45 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.
- 46 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 Electronics, 2012, 42(3): 211.
- 47 W F Kruoke, L L Chase. Ground state depleted (GSD) solid state lasers: principles, characteristics, and scaling[C]. High Power and Solid Lasers II, 1989, 1040: 68-83.
- 48 D S Sumida, T Y Fan. Effect of radiation trapping on fluorescence lifetime and emission cross section measurements in solid-state laser media[J]. Opt Lett, 1994, 19(17): 1343-1345.
- 49 T Y Fan. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6): 1457-1459.
- 50 J Dong, M Bass, Y Mao, *et al.*. Dependence of the Yb<sup>3+</sup> emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet[J]. J Opt Soc Am B, 2003, 20(9): 1975-1979.
- 51 T Taira, J Saikawa, T Kobayashi, *et al.*. Diode-pumped tunable Yb:YAG miniature lasers at room temperature: modeling and experiment[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1997, 3(1): 100-104.
- 52 J Dong, P Deng, Y 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.
- 53 J Dong, A Shirakawa, K Ueda, *et al.*. Near-diffraction-limited passively  $Q$ -switched Yb:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramic lasers with peak power >150 kW[J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(13): 131105.
- 54 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.
- 55 J Dong, K Ueda, A Saikawa, *et al.*. Composite Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG ceramics picosecond microchip lasers[J]. Opt Express, 2007, 15(22): 14516-14523.
- 56 M Tsunekane, T Taira. High peak power passively  $Q$ -switched Yb:YAG micro-lasers[C]. Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2012. 1-2.
- 57 M Tsunekane, T Taira. High peak power, passively  $Q$ -switched Yb:YAG/Cr:YAG micro-lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2013, 49(5): 454-461.
- 58 J Dong, G Y Wang, Y Cheng. Highly efficient passively  $Q$ -switched Yb:YAG microchip lasers under high intensity laser-diode pumping[J]. Laser Phys, 2013, 23(3): 035802.
- 59 J Dong, Y Y Ren, G Y Wang, *et al.*. Efficient laser performance of Yb:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>/Cr<sup>4+</sup>:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> composite crystals[J]. Laser Phys Lett, 2013, 10(10): 105817.
- 60 J Dong, Y Y Ren, H H Cheng. >1 MW peak power, an efficient Yb:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG composite crystal passively  $Q$ -switched laser[J]. Laser Phys, 2014, 24(5): 055801.

栏目编辑: 张 雁