

高重频被动调Q固体激光器研究进展

李梦龙 蒙裴贝 颜凡江 史文宗 冯文 罗萍萍

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 高重频被动调Q固体激光器可广泛应用于高精度激光雷达、微型激光光源、环境探测和微细加工等众多领域,近年来已成为窄脉宽激光研究的热点。当前,为提高激光器的性能所采用的主要技术手段为被动调Q振荡器技术、被动调Q高稳定性主动控制技术以及被动调Q激光放大技术。本文从以上3个方面出发,对国内外高重复频率被动调Q固体激光器的研究进展进行了归纳与总结,介绍了各种技术的不同实施方式,并对高重复频率被动调Q固体激光器的进一步发展及应用给予了展望。

关键词 激光器; 固体激光器; 高重复频率; 被动调Q

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.090001

Progress on Passively Q-Switched Solid-State Lasers

Li Menglong Meng Peibei Yan Fanjiang Shi Wenzong Feng Wen Luo Pingping

Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract Passively Q-switched solid-state lasers with high repetition rates can be widely used in many fields like precision laser radar, miniature laser source, environmental detection and fine processing, which have attracted considerable interests as narrow pulse laser source in recent years. The main techniques for improving the laser's performance include passively Q-switched oscillator, actively-controllable passively Q-switched laser and power amplifier. In this paper, the domestic and international progress on high repetition rates passively Q-switched solid-state lasers are summarized from the above three aspects and the various embodiments of every scheme. In addition, the prospect and applications of the lasers are discussed in the article.

Key words lasers; solid-state lasers; high repetition rate; passively Q-switched

OCIS codes 140.3580; 140.3480; 140.3540

1 引言

被动调Q技术是在激光器谐振腔内设置可饱和吸收体,利用其饱和吸收效应周期性地控制谐振腔损耗来获得脉冲光输出,这种技术有利于获得较窄的脉冲宽度。目前,固体可饱和吸收体已经逐渐取代染料作为常规的调Q元件,与主动调Q相比,高重频被动调Q激光器具有结构简单、体积小和成本低的特点,适合进行复杂的系统集成;脉冲宽度容易实现数纳秒甚至亚纳秒级,可以广泛应用于高精度激光雷达、微型激光光源、环境探测和微细加工等领域^[1-2];并且其不需要高压驱动源,可靠性以及系统兼容性较高,适合应用于条件苛刻的特殊环境中,如机载、星载等平台^[3]。近年来,随着固体激光各单元技术的进步,国内外关于高重复频率被动调Q固体激光器的研究也取得了显著的成绩,正朝着大能量、窄脉宽、高稳定性等方向蓬勃发展。本文由被动调Q振荡器技术、被动调Q主动控制技术以及被动调Q激光放大技术出发,对国内外高重频被动调Q固体激光器的研究进展进行了归纳与总结,并对其进一步的发展及应用给予了展望。

2 被动调Q振荡器技术研究进展

在被动调Q固体激光振荡器中,通常通过微片式结构来有效压缩输出激光的脉冲宽度。即采取薄片状的激光晶体与调Q晶体,尽可能缩短激光谐振腔的总长度。虽然薄片式的激光晶体不利于吸收较高的抽运

收稿日期: 2015-04-01; 收到修改稿日期: 2015-05-01; 网络出版日期: 2015-08-25

作者简介: 李梦龙(1988—),男,博士,工程师,主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: mlli508@163.com

能量,但其紧凑的结构与获得短脉冲输出的能力,使其非常适合作为高质量的高重复频率(千赫兹级)被动调Q激光器种子源。而在众多的调Q晶体中, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 具有损伤阈值高、热导率高、吸收截面大、物理化学性能稳定、光学质量好、可批量生产等优点,已成为最常用的被动调Q晶体^[4],因此,本文主要针对以 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 为被动调Q晶体的固体振荡器技术进行详述。目前,对于高重复频率(千赫兹级)被动调Q固体激光振荡器,在运转模式上,可分为脉冲主动控制以及自由运转两种模式;在抽运结构上,采用光纤耦合输出激光二极管(LD)阵列抽运及单管LD直接近贴抽运等方法;在腔体结构上,存在激光晶体及调Q晶体键合式或者分离式等结构;在增益介质的选择上,除了Nd:YAG晶体外,还有性能优越的Nd:YVO₄、Nd:GdO₄和Yb:YAG等晶体。以下将综述各种方式的国内外研究进展。

早在1992年,美国MIT林肯实验室已经开展了键合微片式被动调Q振荡器的相关研究。1994年,MIT林肯实验室Zayhowski等^[5]采用光纤耦合输出LD抽运Nd:YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 键合微片的方式,结构示意图如图1所示,抽运源为光纤输出LD,光纤芯径为100 μm ,数值孔径为0.37,无光学耦合系统,键合晶体两端直接镀膜形成谐振腔。在抽运功率为1.2 W时,实现了能量输出为11 μJ ,脉宽为337 ps,重复频率为6 kHz的单频TEM₀₀模激光输出。

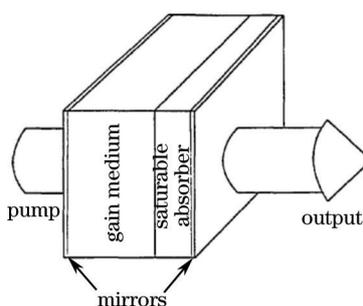


图1 MIT林肯实验室微片激光器示意图

Fig.1 Microchip laser experimental setup of MIT

在此后的几年里,他们先后研发了多种改进型的这种微片激光振荡器^[6],抽运方式包含连续抽运和脉冲抽运。在这些激光器中,单一指标平均输出功率最高的可达650 mW,最短的脉冲宽度可以达到310 ps,而最高的单脉冲能量可以达到250 μJ ,并且基于此基频激光相继得到了二、三、四倍频输出。

2011年,美国Sigma空间公司Konoplev等^[7]采用类似的被动调Q技术,在板条晶体上键合调Q晶体,使用808 nm光纤输出LD激光,采用单端抽运模式,获得了脉宽为1.5 ns,重复频率为10~15 kHz,单脉冲能量约为70 μJ 的激光输出。

为了节省体积,一些研究单位采用无光纤耦合输出的LD或其阵列,通过透镜耦合抽运激光进入到晶体。2011年,中国科学院西安光机所利用自聚焦透镜将LDbar条输出的连续光直接导入Nd:YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 键合晶体中,晶体两端面直接镀膜形成谐振腔,这样保持了激光器的紧凑性,获得了重复频率为4.4 kHz、单脉冲能量为32.5 μJ 的1064 nm调Q光输出,脉冲宽度压缩至715 ps^[8]。

清华大学在2007年采用Nd:YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 键合晶体微片,两面镀膜直接形成谐振腔,利用脉冲式抽运主动控制调Q激光的频率,在10 kHz的确定重复频率下,获得了脉宽为2 ns,单脉冲能量为2.8 μJ 的1064 nm光脉冲输出^[9]。其中抽运源为快轴准直的单管LD,贴近晶体放置以获得紧凑的体积与集中的抽运能量。

为了进一步减小体积,一些研究单位采用单管LD直接近贴抽运激光晶体。2010年,北京师范大学的研究人员^[10]利用无快轴准直单管LD直接端面抽运Nd:YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 键合晶体,LD紧贴晶体放置,未采用任何光学耦合系统,激光器体积得以有效减小。其LD抽运的激光器的谐振腔总长度2.75 mm(键合晶体两端镀膜成腔,晶体长度为2 mm),实验光学结构如图2所示^[10]。中国华北光电研究所的研究人员也利用同类结构,同年使用相似的单管LD直接端面抽运Nd:YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 键合晶体,得到了876 ps的脉宽、7.4 μJ 的脉冲能量、8 kHz重复频率的激光输出^[11]。

以上可见采用Nd:YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 已经可以实现高重复频率(千赫兹)、窄脉宽的激光脉冲输出,脉冲能量已可达到数十微焦甚至百微焦级。但Nd:YAG较窄的吸收带宽使得其对抽运源LD的光谱有很高的要求。相比于Nd:YAG,Nd:YVO₄和Nd:GdVO₄具有更大的受激发射截面和吸收截面和更宽的吸收谱线,因此

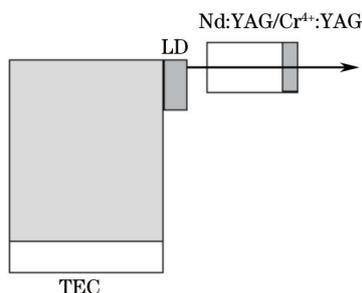
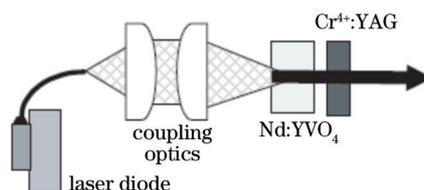


图2 北京师范大学激光器结构示意图

Fig.2 Microchip laser experimental setup of BNU

也受到国内外研究机构的广泛关注。

2002年,台湾Chen等^[12]采用c轴切割、掺杂原子数分数为1%、长度为5 mm的Nd:YVO₄作为激光晶体,采用芯径为200 μm、数值孔径为0.18的光纤耦合LD作为抽运源,透射率为60%的Cr⁴⁺:YAG作为被动调Q晶体,分离式结构腔长约为6~7 mm,结构如图3所示。实行连续抽运模式,获得了重复频率为13.5 kHz,脉宽为0.85 ns,能量为18 μJ,光束质量因子 $M^2 < 1.2$ 的激光输出。

图3 Nd:YVO₄被动调Q激光器试验装置示意图Fig.3 Nd:YVO₄ passively Q-switched laser experimental setup

2006年,法国巴黎十一大学光学研究所Forget等^[13],采用1 mm厚,掺杂原子数分数为1%的Nd:GdVO₄与长0.4 mm、吸收系数4 cm⁻¹的Cr⁴⁺:YAG光学胶合,在吸收2.2 W抽运功率下,实现了重复频率为85 kHz,平均功率为400 mW,脉冲宽度为1.1 ns的1063 nm高重频单纵模输出。

近年来,人们通过对Yb:YAG晶体的深入研究,发现其与传统的Nd:YAG晶体相比较,具有一些独特的优势。首先,它的量子亏损较低,可以有效减弱激光器的热效应并提高激光器的光学效率;其次,较小的发射截面提升了饱和光强,有利于获得较高的脉冲能量;同时,晶体还具有较长的上能级粒子寿命,有利于晶体中抽运能量的贮存;此外,晶体可以进行高浓度的掺杂,对于微片状晶体而言,可有效提高对抽运能量的吸收。

2007年,日本电信大学的Dong等^[14]研制了高效的LD抽运被动调Q全陶瓷键合Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG微片激光器。其中Yb:YAG和Cr⁴⁺:YAG的厚度分别为1.2和1.5 mm,掺杂原子数分数分别为9.8%和0.1%,Cr⁴⁺:YAG对1030 nm的初始透射率约为70%。最终获得了重复频率为3.5 kHz,脉冲能量为172 μJ,脉冲宽度为237 ps,峰值功率为0.72 MW的1030 nm激光输出。

综上所述,对国内外被动调Q固体振荡器技术进展状况进行了总结。从中可见对于高重复频率被动调Q固体激光振荡器而言,国内机构虽在单一指标上与国际相持平,但综合指标仍略低于国外先进水平,且在新型晶体激光器的研发方面,与国外相比仍有一定的差距。

3 被动调Q高稳定性主动控制技术研究进展

对于被动调Q激光器而言,由于抽运光强度、光谱和空间特性、自发辐射噪声、剩余反转粒子数目的差别及各种外界环境的影响(主要影响腔损耗和增益),调Q脉冲能量及发射延时极易抖动。针对激光雷达等实际应用系统而言,必须有效降低这种抖动。同时由于被动调Q的饱和吸收机理,使其重复频率随激光功率变化,也不利于在需要确定重复频率的设备上应用。目前国内外已开展相关研究,聚焦于实现主动控制的稳定的被动调Q脉冲输出。主要采用的技术手段有以下3种:增益预抽运技术、外部光触发技术与自种子注入技术^[15-23]。

3.1 增益预抽运技术

对于增益预抽运法,其机制为:在抽运脉冲的间隔期,给予恒定的基电流,使其抽运功率尽可能靠近激

光器振荡阈值,需要输出脉冲时,在基电流上叠加高电流脉冲,使上能级粒子数迅速积累并释放能量。这样在每一次Q开关打开前,激光器反转粒子数将趋于相似,从而为每一个调Q脉冲制造相同的初始条件,削弱调Q脉冲的不稳定性。同时,调Q脉冲依附于可控的抽运脉冲序列产生,因此该方法也获得了激光脉冲稳定性良好的激光输出^[15-16]。

清华大学^[17]在此方面的研究取得了不俗的进展,2004年采用Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG键合晶体微片,利用增益预抽运法,在主动控制频率1 kHz下,获得了脉宽为734 ps,单脉冲能量为5.5 μJ的稳定1064 nm光脉冲输出,脉冲时间抖动小于12 μs,脉冲幅值不稳定性优于1.26%。实验光路图如下图4所示。

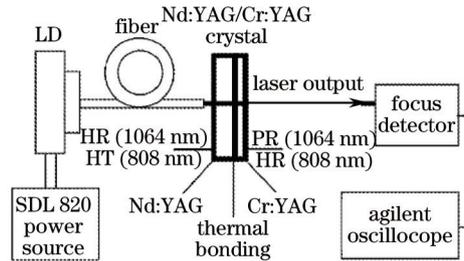


图4 清华大学激光器试验装置示意图

Fig.4 Passively Q-switched laser experimental setup of Tsinghua University

2014年,北京工业大学苏艳丽等^[18]采用类似的预抽运技术,在LD抽运的Cr⁴⁺:YAG被动调Q微片激光器中获得重复频率连续可调、稳定振荡的激光脉冲输出。在重复频率为20 kHz时,获得脉冲宽度为2.431 ns,单脉冲能量17.6 μJ,消光比为252:1的脉冲输出,其幅度不稳定性约为4.00%,重复频率不稳定性约为2.40%。

3.2 外部光触发技术

为了获得高稳定性激光输出,研究人员又提出了一种对被动调Q激光器的主动控制技术,即在普通的被动调Q激光器基础上外加光触发激光源,光触发激光源的激光通过照射可饱和吸收体,影响饱和吸收体对被动调Q激光器的振荡激光的吸收系数,从而实现被动调Q激光器工作状态的主动控制。通过控制该外加LD的开关时刻以及工作方式,可以精确控制被动调Q激光器输出激光脉冲的开始结束时刻以及脉冲重复频率,同时降低吸收体对激光脉冲形成过程的影响,使调Q脉冲的形成更加快速,有效减少各种不稳定因素对激光脉冲的作用,提高脉冲稳定性。外加的控制激光源可以是半导体激光器,也可以是固体激光器^[19-20]。

2008年,清华大学段玉生等^[21]在普通的Cr⁴⁺:YAG晶体被动调Q激光器基础上,使用外加的808 nm激光器照射Cr⁴⁺:YAG晶体,周期性影响其对调Q激光器中1064 nm振荡激光的吸收系数,产生调Q激光脉冲,实现对被动调Q激光器的主动控制。通过调控光触发LD的开关时刻以及工作方式,输出激光脉冲的延时及重复频率都可以得到精确便捷的调控。

2013年,台湾中央研究院的科研人员,利用一台主动调Q的脉冲激光器作为外部光照源对被动调Q晶体Cr⁴⁺:YAG进行周期性照射。整体谐振腔结构如图5所示^[22],激光器采用简单的直线平平腔,抽运源采用100 Hz重复频率的光纤耦合LD模块,其抽运脉冲触发信号与重复频率为100 Hz的光照源信号之间保持一定的延时,最终获得了稳定的250 μJ能量脉冲输出,脉冲宽度优于1 ns,能量稳定性优于1%。同时,与传统的被动调Q激光相比,脉冲延时抖动减小了10倍,达到优于600 ps的水平。

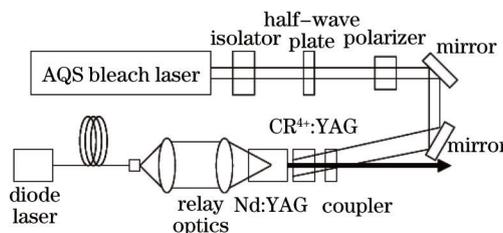


图5 台湾中央研究院激光器试验装置示意图

Fig.5 Passively Q-switched laser experimental setup of Academia Sinica in Taipei

3.3 自种子注入技术

在2010年,德国耶拿的研究人员^[23]提出了一种新型的自种子注入技术来实现高稳定性的被动调Q激光

输出,即由被动调Q激光器的输出脉冲中截取一部分激光,经过延迟后当做种子光注入谐振腔中起振,这样使激光振荡由种子光而不是自发辐射建立。此技术可以有效地抑制自发辐射噪声,使每次激光脉冲建立的初始条件趋于一致,从而有效地提高了稳定性。

激光器结构示意图如图6所示^[23],激光晶体为微片式Nd:YVO₄结构,由半导体可饱和吸收镜作为被动调Q元件,产生的脉冲一部分由分光镜截取,送入光学延迟器,并经由光纤布拉格光栅进行线宽压缩,延迟后反射进入谐振腔起振,输出下一个调Q脉冲,光学延迟器的延迟时间经过计算与激光器自由运转的周期满足特定的关系。最终,在重复频率为500 kHz时,实现了脉宽为200 ps,能量为130 nJ的激光输出,脉冲间抖动由自由运转状态的几个纳秒,降低至20 ps。

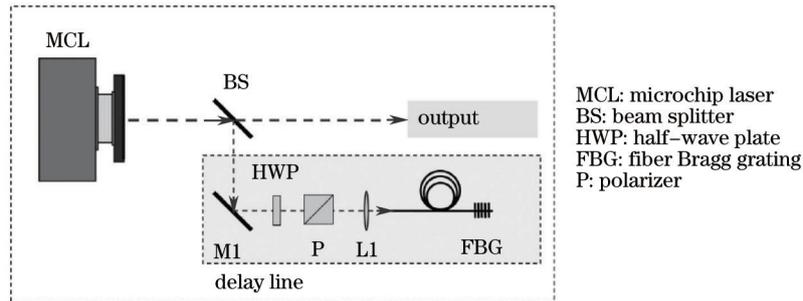


图6 自种子注入法激光器示意图

Fig.6 Schematic of self-injection seeding laser

综上所述,这几种新方法均有利于提高被动调Q激光脉冲的能量稳定性、降低脉冲间的时间抖动性。只是,几种技术尚不够成熟,综合指标(脉宽、能量、重复频率)较传统的被动调Q激光器而言尚有一定差距,仍需要时间与投入来进行技术攻关,是将来被动调Q激光器研究的重要发展方向。

4 被动调Q激光放大技术研究进展

通过以上的介绍,可见被动调Q激光振荡器输出的光脉冲在重复频率和脉宽的表现上令人满意,然而由于其对超短谐振腔及对优异光束质量的依赖,单一由振荡器输出的脉冲能量通常较低,尚不能满足一些应用的需求。因此,近年来人们逐渐将主振荡级功率放大器技术(MOPA)与被动调Q振荡器技术相结合,使被动调Q光脉冲在维持高重复频率和窄脉宽的状态下,能量得以放大,弥补了被动调Q振荡器的不足。国内外在被动调Q放大器的研究上,总体而言可以分为三类,下面分别叙述这些放大器的技术发展状态。

4.1 固体板条放大器技术

对于传统的固态放大器,增益介质的圆棒式形状内部会存在比较严重的热效应,这限制了大功率、高光束质量的激光输出。为了从结构上根本改善这一问题,板条放大器应运而生。顾名思义,其增益介质通常做成板条状,这种特殊的平板状结构,可以有效地降低激光器的热效应。

美国JGM公司的研究人员在2005年,对重复频率为10 kHz、能量为20 μJ、脉宽为1.4 ns的微片调Q种子激光进行了放大实验^[24]。放大器采用zig-zag板条结构,增益晶体采用的是一块板条状Nd:YVO₄晶体,尺寸为6 mm×2 mm×15 mm,掺杂原子数分数为0.5%,板条一端切有1°的楔角,以抑制寄生振荡,板条晶体的两大面与热沉接触进行散热。激光在其中沿Z字形传输,单次传输路径约为5.5 cm,激光可由反射镜返回形成双次通过。板条晶体两侧面均由20 W的连续808 nm LD阵列抽运。经过放大器后,获得了重复频率为10 kHz、能量为570 μJ、脉宽为1.4 ns的1064 nm激光输出。

近年来,美国、意大利、中国等国家的多家研究机构对同类型的被动调Q板条放大器方案进行了多方面研究^[25-31],他们采用的板条晶体不同,如Nd:YVO₄晶体与Nd:YAG晶体;放大体制上存在着多通单级与单通多级模式的区别,放大器内传输方式也存在不同,如传统的Z字形光路与新型的掠入射光路。这些机构先后获得的高重复频率的激光其频率涵盖数千赫兹至数十千赫兹,脉冲能量均达到了数百微焦甚至毫焦量级,脉宽基本实现了亚纳秒级(<1 ns)。图7所示的为其中一种典型的放大器构造方式。

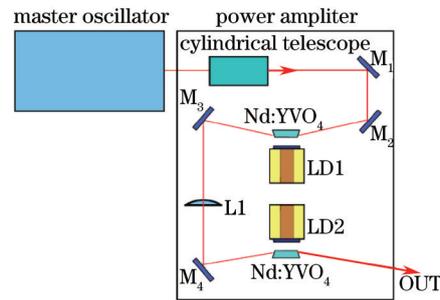


图7 固体激光放大器示意图

Fig.7 Experimental setup of solid-state laser amplifier

4.2 光纤放大器技术

与传统的全固态激光器相比,光纤激光振荡器以及放大器具有优异的光束质量、较高的电光转换效率、低维修成本、高稳定性、小体积以及方便的可运输性等优点^[32]。其热负载具有较好的分散性,作为放大器而言,可以有效减弱对种子光造成的空间畸变;同时其较长的激光增益区可以维持放大过程中高的能量提取效率。

2006年,美国利弗莫尔实验室进行了系列掺Yb双包层石英光纤(Y-DCF)放大被动调Q激光的实验。种子源为脉冲宽度为2.3 ns、重复频率为1 kHz的1064 nm Nd:YAG微片激光器,经过放大器后,实现脉冲宽度为2.3 ns、重复频率为1 kHz、单脉冲能量为1.1 mJ激光输出。如下图8所示^[33],放大器采用端面后向抽运方式,由一功率为50 W的光纤耦合974 nm LD模块进行抽运,光纤芯径为200 μm ,数值孔径为0.22。一段5.3 m长的掺Yb双包层石英光纤作为增益介质,其光纤芯径为30 μm ,数值孔径为0.076,端面熔接熔融石英端帽,端帽的输出面制成8°楔角以减小端面反馈效应。

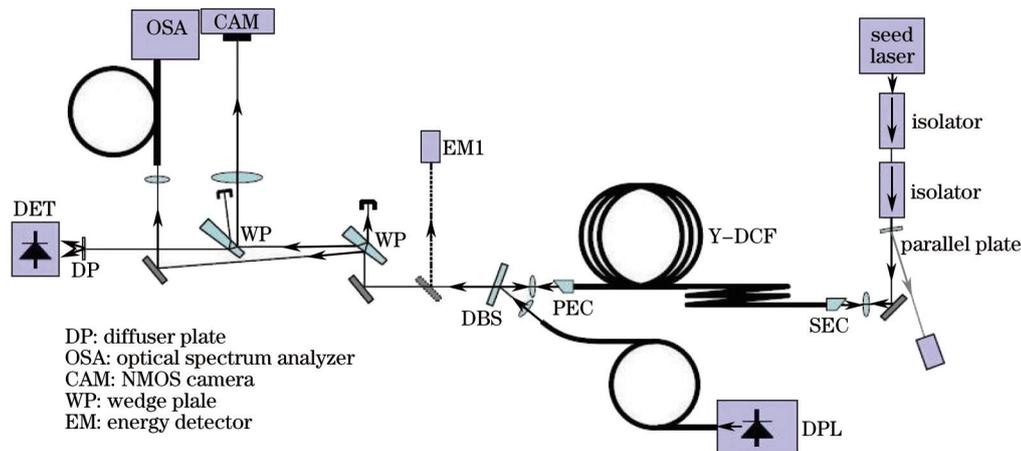


图8 光纤激光放大器示意图

Fig.8 Experimental setup of fiber laser amplifier

在随后几年的研究中,美国、俄罗斯、中国等国家的高水平研究机构相继实现或者提升了同类放大技术的指标。在这些报道中,激光重复频率一般集中于10 kHz左右,脉冲宽度均已实现了1 ns的水平,有些甚至可达百皮秒级别;能量已成倍增加,提升至数毫焦量级^[34-37,39]。

值得注意的是2005年美国Aculight公司的Brooks等^[38]采用掺Yb的光纤放大器作为第一级放大,采用大芯径单模光子晶体光纤放大器作为第二级放大,将脉宽为1 ns的弱种子激光放大到单脉冲能量大于1 mJ,峰值功率大于1 MW,平均功率大于10 W。两年后,该公司在此激光器构造的基础上,又增加了一级放大器,采用长度为0.9 m的大芯径100 μm 的棒式掺Yb光子晶体光纤,进一步将能量提升至4.3 mJ^[39]。

在上述的技术方案中,出现了光子晶体光纤,这是一种新型的光纤技术,它由单一材料构成,包层中具有周期性微米量级空气孔结构,光通过全内反射或者光子带隙效应被约束在纤芯中传导,可以通过改变空气孔的排列及大小精确调控包层与纤芯的有效折射率差,从而获得超大模场单模光纤。相较于传统的光纤放大器而言,大模面积非常有利于抑制高峰值功率密度所带来的非线性效应,使光纤中可以获得更高的激光能量、更窄的激光脉宽^[40-42]。

2011年,法国 Paris-Sud 大学的研究人员对 Nd:YAG 晶体构造的光子晶体光纤放大器进行了一系列深入的研究,获得了突破性的大模场光纤。随后利用被动调 Q 微片 1064 nm 激光器(脉宽为 0.45 ns、重复频率为 1 kHz、单脉冲能量为 80 μ J)作为种子源进行放大,激光器光学结构示意图如图 9 所示^[43],种子源出射的激光被透镜聚焦耦合进入 50 mm 长的芯径为 1 mm 的光子晶体光纤。放大器由光纤耦合 LD 模块进行抽运,抽运光为 1 kHz 重复频率的脉冲模式。在经历往返双通过后,激光被放大到脉宽为 0.45 ns、重复频率为 1 kHz、单脉冲能量为 2.7 mJ。随后以此为基础,亦实现了相应的大能量二倍频及四倍频激光^[44]。

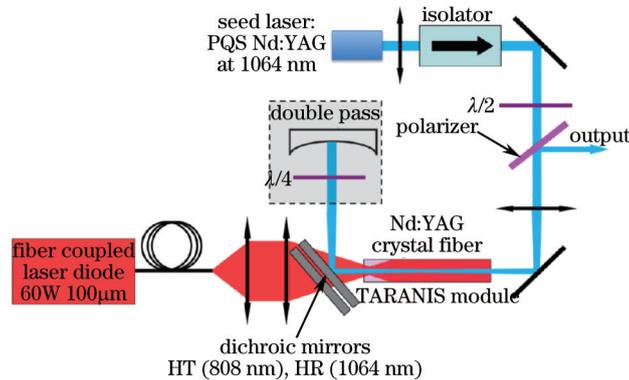


图9 光子晶体光纤激光放大器示意图

Fig.9 Experimental setup of single-crystal fiber laser amplifier

4.3 光波导放大器技术

光波导是在透明介质衬底表面上或内部形成的折射率相对较高的微型区域,此区域被折射率较低的区域包裹,从而将光限制在微米量级的结构内进行传输。光波导放大器的优势在于波导结构能够有效地抑制光束衍射,在很长一段传输距离内维持较高的光密度,这样就使得激光增益一直维持在较高的水平而获得较高的能量放大率^[45-46]。

2012年,美国 Raytheon 公司采用平面波导结构对微片被动调 Q 激光进行放大。放大器中 Yb:YAG 的掺杂原子数分数为 5%,中心厚度为 40 μ m,宽度为 1.75 mm,长度为 35 mm,夹在作为包层的两个 YAG 板之间。波导放大器与两个微通道热沉直接接触,其抽运源为 940 nm 沿空间传播的 LD,由多个柱透镜将抽运光镜像到波导激光器上,放大器光学示意图如图 10 所示。作为种子激光的 1030 nm 光能量为 100 μ J,脉宽 0.82 ns,单次通过波导后, Raytheon 获得的最高功率为 22 W(单脉冲能量为 2.2 mJ,重复频率为 10 kHz),脉冲的频谱宽度和时间宽度均与种子光特性一致^[47-48]。

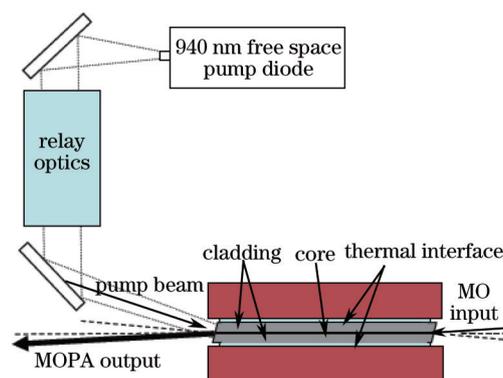


图10 平面波导激光放大器示意图

Fig.10 Experimental setup of planar waveguide laser amplifier

综上所述,对国内外被动调 Q 激光器的放大器技术发展状况进行了总结,可见 MOPA 技术可以使被动调 Q 光脉冲在维持高重频和窄脉宽的状态下,能量得以放大达到毫焦量级,有效弥补了被动调 Q 激光器能量偏低的不足。同时,国内的研制水平与国外相比有一定的差距,指标低于国外先进水平,且在新型放大器技术上投入较少,无明显技术突破与改进。

5 结 论

当前,国内外研究人员关于高重频被动调Q固体激光器的研究目标集中于获得更高的重复频率、更窄的脉冲宽度、更稳定的脉冲序列以及更高的能量,所采用的主要技术手段为被动调Q振荡器技术、被动调Q高稳定性主动控制技术以及被动调Q激光放大技术。本文由以上3个方面出发,对国内外高重频被动调Q固体激光器的研究进展进行了归纳与总结。从中可见高重频被动调Q振荡器已可以输出数十微焦甚至百微焦能量的激光,脉宽可压缩至数百皮秒量级,且正朝着更加紧凑、更加稳定的结构发展;被动调Q高稳定性主动控制技术已可以实现能量抖动与脉冲时间间隔抖动优于1%,不稳定性的机理正逐步被揭示和完善,多种调控方法正并行发展;被动调Q激光放大技术已可使高重复频率、窄脉宽激光能量放大至毫焦量级,在放大方式上,已覆盖现行的多种激光器体制,如固体板条、光纤、波导等增益模块。随着相关科学研究的深入与工业技术的不断进步,对高重频被动调Q光源的需求将持续增加,必将牵引这种激光器向着“更高(能量提升)、更快(脉宽更窄)、更强(稳定性更强)”的方向快速、稳健的发展。

参 考 文 献

- 1 J J Zayhowski. Compact solid-state sources and their applications[C]. SPIE, 2004, 5620: 155-169.
- 2 Dong Jun, Ma Jian. Advances in passively Q-switched Yb³⁺-doped laser materials microchip solid-state lasers[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(9): 2278-2288.
董俊,马剑. 被动调Q掺Yb³⁺激光材料固体微片激光器的研究进展[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2278-2288.
- 3 A W Yu, M A Krainak, D J Harding, *et al.*. A 16-beam non-scanning swath mapping laser altimeter instrument[C]. SPIE, 2013, 8599: 85990P.
- 4 Yang Chengwei, Chen Qiansong, Xiong Ke, *et al.*. Recent developments on Cr⁴⁺:YAG passively Q-switched lasers[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(1): 21-24.
杨成伟,陈千颂,熊轲,等. Cr⁴⁺:YAG被动调Q激光器进展[J]. 激光与红外, 2003, 33(1): 21-24.
- 5 J J Zayhowski, C Dill. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers[J]. Opt Lett, 1994, 19(18): 1427-1429.
- 6 J J Zayhowski, C Dill, C Cook, *et al.*. Mid- and high-power passively Q-switched microchip lasers[C]. ASSL 1999, 26: 178-186.
- 7 O A Konopleva, A A Vasilyeva, A A Seasb, *et al.*. Multi-watt average power nanosecond microchip laser and power scalability estimates[C]. OSA/ASSP, 2011: ATuB16.
- 8 Linqun Niu, Cunxiao Gao, Shaolan Zhu, *et al.*. Single- and dual-pulse oscillation in a passively Q-switched Nd:YAG microchip laser[J]. Opt Exp, 2011, 19(21): 20628-20633.
- 9 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.
- 10 J Y Meng, H X Wang. Single diode-pumped, 1.7 ns microchip laser by Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG composite crystal[J]. Laser Phys, 2011, 21(1): 79-81.
- 11 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紧耦合抽运被动调Q微型激光器实验研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(6): 609-612.
- 12 Y F Chen, Y P Lan. Comparison between c-cut and a-cut Nd:YVO₄ lasers passively Q-switched with a Cr⁴⁺:YAG saturable absorber[J]. Appl Phys B, 2002, 74: 415-418.
- 13 Sebastien Forget, Frederic Druon, François Balembois, *et al.*. Passively Q-switched diode-pumped Cr⁴⁺:YAG/Nd³⁺:GdVO₄ monolithic microchip laser[J]. Opt Commun, 2006, 259: 816-819.
- 14 Jun Dong, Kenichi Ueda, Akira Shirakawa, *et al.*. Composite Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG ceramics picosecond microchip lasers [J]. Opt Exp, 2007, 15(22): 14516-14523.
- 15 Wang Weiyu, Gong Mali, Liu Xingzhan, *et al.*. Stability of passively Q-switched solid-state lasers and pre-pumping mechanism[J]. Laser & Infrared, 2000, 30(2): 74-77.
王为宇,巩马理,刘兴占,等. 被动调Q固体激光器的稳定性及增益预抽运技术[J]. 激光与红外, 2000, 30(2): 74-77.
- 16 Jacob B Khurgin, Feng Jin, Gregory Solyar, *et al.*. Cost-effective low timing jitter passively Q-switched diode-pumped solid-state laser with composite pumping pulses[J]. Appl Opt, 2002, 41(6): 1095-1097.

- 17 Xinning Tian, Ping Yan, Qiang Liu, et al.. Pre-pumped passively Q -switched Nd:YAG/Cr:YAG microchip laser[J]. Chin Opt Lett, 2004, 2(9): 536-537.
- 18 Su Yanli, Luo Xu, Zhang Xuehui, et al.. Repetition rate continuously tunable microchip laser passively Q -switched by Cr^{4+} :YAG[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2): 355-359.
苏艳丽, 罗旭, 张学辉, 等. 重复频率连续可调谐的 Cr^{4+} :YAG 被动调 Q 微片激光器[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 355-359.
- 19 Xiaodong Yin, Chengwei Yang, Dalong Zhao, et al.. Actively-controllable passively Q -switched Laser[C]. SPIE, 2005, 5627: 199-208.
- 20 Brian Cole, Lew Goldberg, C Ward Trussell, et al.. Reduction of timing jitter in a Q -switched Nd:YAG laser by direct bleaching of a Cr^{4+} :YAG saturable absorber[J]. Opt Exp, 2009, 17(3): 1766-1771.
- 21 Duan Yushen, Huo Yujing, He Shufang. Study on controllable passively Q -switched lasers[J]. J synthetic crystals, 2008, 37(1): 5-10.
段玉生, 霍玉晶, 何书芳. 可主动控制的被动调 Q 激光器的研究[J]. 人工晶体学报, 2008, 37(1): 5-10.
- 22 HanSung Chan, ShaoYu Wang, ShouTai Lin, et al.. Sub-nanosecond timing jitter in a passively Q switched microlaser by active Q -switched laser bleaching[C]. CLEO, 2013, WA4-6.
- 23 Alexander Steinmetz, Dirk Nodop, Andreas Martin, et al.. Reduction of timing jitter in passively Q -switched microchip lasers using self-injection seeding[J]. Opt Lett, 2010, 35(17): 2885-2887.
- 24 Jeffrey G. Manni. Amplification of microchip oscillator emission using a diode-pumped wedged-slab amplifier[J]. Opt Commun, 2005, 252: 117-126.
- 25 York E Young, Kevin J Snell, John C McCarthy, et al.. 1 MW peak-, 20 W average-power, sub-nanosecond pulse amplifier[C]. OSA, CLEO 2004: CTuCC6.
- 26 Y Wang, M Gong, P Yan, et al.. Stable polarization short pulse passively Q -switched monolithic microchip laser with [110] cut Cr^{4+} :YAG[J]. Laser Phys Lett, 2009, 6(11): 788-790.
- 27 A Agnesi, P Dallocchio, S Dell'Acqua, et al.. High peak power sub-nanosecond MOPA laser[C]. EPS-QEOD Europhoton conference, 2010: WeB5.
- 28 Sun Zhe, Chen Xin, Jiang Menghua, et al.. Compact side pumped double pass Nd:YVO₄ slab laser amplifier[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(11): 2111-2115.
孙哲, 陈欣, 姜梦华, 等. 半导体抽运双通 Nd:YVO₄板条激光放大器[J]. 光电子·激光, 2013, 24(11): 2111-2115.
- 29 Yelena Isyanova, Jeffrey G Manni, David Welford, et al.. High-power, passively Q -switched microlaser-power amplifier system[C]. ASSL, 2001, 50: 186-190.
- 30 S Forget, F Balembois, P Georges, et al.. A new 3D multipass amplifier based on Nd:YAG or Nd:YVO₄ crystals[J]. Appl Phys B, 2002, 75: 481-485.
- 31 A Agnesi, P Dallocchio, F Pirzio, et al.. Sub-nanosecond single-frequency 10-kHz diode-pumped MOPA laser[J]. Appl Phys B, 2010, 98: 737-741.
- 32 Li Pingxue, Yang Chun, Yao Yifei, et al.. Research progress of 980 nm fiber laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100001.
李平雪, 杨春, 姚毅飞, 等. 980 nm 光纤激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 100001.
- 33 Roger L Farrow, Dahv A VKliner, Paul E Schrader, et al.. High-peak-power (>1.2 MW) pulsed fiber amplifier[C]. SPIE, 2006, 6102: 61020L.
- 34 Du Songtao, Wang Ziwei, He Jing, et al.. Study on characteristics of picosecond pulsed fiber amplifier with high peak power[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602014.
杜松涛, 王子薇, 何晶, 等. 高峰值功率亚纳秒脉冲光纤放大器特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602014.
- 35 Fabio Di Teodoro, Christopher D. Brooks. Multistage Yb-doped fiber amplifier generating megawatt peak-power, subnanosecond pulses[J]. Opt Lett, 2005, 30(24): 3299-3301.
- 36 Fabio Di Teodoro, Christopher D. Brooks. M W peak-power, mJ pulse energy, multi-kHz repetition rate pulses from Yb-doped fiber amplifiers[C]. SPIE, 2006, 6102: 61020K.
- 37 A V Kir'yanov, S M Klimentov, A N Knigavko, et al.. Specialty-fiber amplifier for a microchip laser: a ~1-mJ, 1-ns output at a multi-kHz repetition rate[C]. OSA, 2009: JTUB16.
- 38 Christopher D Brooks, Fabio Di Teodoro. 1-mJ energy, 1-MW peak-power, 10-W average power, spectrally narrow, diffraction-limited pulses from a photonic-crystal fiber amplifier[J]. Opt Exp, 2005, 13(22): 8999-9002.

- 39 Fabio Di Teodoro, Christopher D. Brooks. Multi-MW peak power, single transverse mode operation of a 100 micron core diameter, Yb-doped photonic crystal rod amplifier[C]. SPIE, 2007, 6453: 645318.
- 40 Zhang Yin, Chen Mingyang, Zhang Yongkang. Investigation of a novel large-mode-area photonic crystal fiber transmission system and its transmission characteristics[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1205001.
张 银, 陈明阳, 张永康. 新型大模场光子晶体光纤传输系统及其传输特性分析[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1205001.
- 41 Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(1): 57-66.
王清月, 胡明列, 柴 路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. 中国激光, 2006, 33(1): 57-66.
- 42 Li Pingxue, Zhao Ziqiang, Zhang Guangju, *et al.*. Large-mode-area double-cladding Yb-doped photonic crystal fiber Q-switched mode-locked laser with graphene-based saturable absorber mirror[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0402001.
李平雪, 赵自强, 张光举, 等. 大模场双包层掺镱光子晶体光纤反射式石墨烯被动调Q锁模激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0402001.
- 43 Igor Martial, François Balembois, Julien Didierjean, *et al.*. Nd:YAG single-crystal fiber as high peak power amplifier of pulses below one nanosecond[J]. Opt Exp, 2011, 19(12): 11667-11679.
- 44 Loïc Deyra, Igor Martial, François Balembois, *et al.*. Megawatt peak power, 1 kHz, 266 nm sub nanosecond laser source based on single-crystal fiber amplifier[J]. Appl Phys B, 2013, 111: 573-576.
- 45 Yang Tianxin, Yu Chao, Li Shuqing, *et al.*. Thermal stress analysis of double-cladding planar waveguide lasers[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 26-29.
杨天新, 于 超, 李树青, 等. 双包层平面波导激光器中热应力的分析[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 26-29.
- 46 Chen Xi, Wang Tianjiao, Liu Shusen, *et al.*. Polymer planar waveguide amplifier doped with LiYF₄:Er,Yb nanocrystals [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0206001.
陈 曦, 王天娇, 刘树森, 等. 掺杂 LiYF₄:Er, Yb 纳米晶的聚合物平面光波导放大器[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0206001.
- 47 Eric P Ostby, Joseph Fukumoto, Robert D. Stultz, *et al.*. Short pulse and high repetition rate Q-switched Yb:YAG microchip laser[C]. SPIE, 2005, 5707: 72-80.
- 48 Anthony W Yu, Alexander Betin, Michael A Krainak, *et al.*. Highly efficient Yb:YAG master oscillator power amplifier laser transmitter for lidar applications[C]. OSA/CLEO, 2012: JTh11.

栏目编辑: 宋梅梅