

全固态高重频电光调 Q 激光器研究进展

冉子涵, 赵一鸣, 李 静, 李之通, 李祚涵
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 全固态高重频电光调 Q 激光器因具有高重频、窄脉宽、大能量的优势而广泛应用于激光雷达、激光测距、激光精密加工和光通信等诸多领域。介绍电光调 Q 元件的发展和增益介质的完善对提高激光器重复频率的影响, 短腔法和腔倒空技术的应用对压窄激光器脉冲宽度的作用, 双棒串接技术和主振荡功率放大技术的运用对增大激光器单脉冲能量的效果。对全固态电光调 Q 激光器的主要研究方向和关键技术进行总结, 综述全固态电光调 Q 激光器在提高重复频率、压窄脉冲宽度和增大单脉冲能量三方面的研究进展。

关键词: 全固态激光器; 高重复频率; 电光调 Q

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2021)02-0001-12

Research progress of all-solid-state high-repetition frequency electro-optic Q-switched lasers

RAN Zihan, ZHAO Yiming, LI Jing, LI Zhitong, LI Zuohan
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: All-solid-state high-repetition frequency electro-optical Q-switched lasers are widely used in many fields such as lidar, laser ranging, laser precision machining, and optical communication due to their advantages of high repetition frequency, narrow pulse width, and large energy. The effects of the development of electro-optic Q-switching components and the improvement of gain media on the improvement of laser repetition frequency, the application of short cavity method and cavity-dumped technology to narrow the pulse width of lasers, the application of double rod series connection technology and main oscillation power amplification to increase the energy of a single laser pulse are introduced. The main research directions and key technologies of all-solid-state electro-optic Q-switched lasers are summarized, and the research progress of all-solid-state electro-optic Q-switched lasers in three aspects: increasing repetition frequency, narrowing pulse width and increasing single pulse energy are mainly reviewed.

Key words: All-solid-state laser; High repetition rate; Electro-optic Q-switched

引 言

自 1960 年第一台激光器问世以来, 激光技术得到蓬勃发展, 广泛应用于多个领域。从 20 世纪 80 年代中后期开始, 固体激光技术和半导体激光技术因其特有的优势被人们所青睐, 一种崭新的激光器——激光二极管 LD (Laser Diode) 泵浦的全固态激光器 DPSSL (Diode Pumped Solid State Laser) 应运而生。LD 泵浦的全固态激光器具有体积小、重量轻、结构紧凑、寿命长等优点, 广泛应用于军事、加工、医疗和科学研究等诸多领域。特别是高重频窄脉宽大能量固体激光器在激光雷达、激光测距、激光精密加工和光通信等诸多领域被广泛应用^[1-8]。

LD 泵浦的全固态激光器采用调 Q 方式可获得高重频窄脉宽激光输出, 主动调 Q 和被动调 Q 是调 Q 方式的两大类。被动调 Q 方式由于不需要附加的偏振光学元件, 更易于获得窄脉宽激光输出, 但其输出稳定性差, 难以实现精确同步输出, 限制了其在许多领域的应用^[9]。电光调 Q 和声光调 Q 是常用的主动调 Q 方式。其中, 声光调 Q 方式可获得高重频激光运转, 但是其开关速度较慢, 获得的激光脉冲宽度较宽。而电光调 Q 方式开关速度快、关断能力强, LD 泵浦的全固态激光器结合电光调 Q 方式可获得高重频窄脉宽激光输出^[7,10]。高重频窄脉宽激光器为获得大能量激光输出, 可通过直接在振荡器内采用双

激光晶体串接方式或者在振荡器外采用主振荡功率放大技术 MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 实现。本文从电光调 Q 激光器的重复频率、脉冲宽度、单脉冲能量三方面对全固态电光调 Q 激光器的研究进展进行综述。

1 电光调 Q 激光器的重复频率

电光调 Q 激光器输出激光的重复频率与电光调 Q 元件的特性密切相关, 也与增益介质的光学特性有关。电光晶体的电光系数、压电环效应、旋光效应等会影响激光器的重复频率。依据电光晶体的电光特性制成的电光偏转器相比于电光晶体调 Q 元件降低了驱动电压, 提高了重复频率。除此之外, 增益介质的上能级寿命也会限制激光器的重复频率。下面从电光调 Q 元件和增益介质的选择两方面, 对高重频电光调 Q 激光器的发展进行综述。

1.1 电光晶体

电光晶体在外加电场的的作用下折射率发生变化, 导致激光传播特性发生改变, 引发的电光效应是电光调 Q 的物理基础^[11]。磷酸二氩钾 KD*P (KD_2PO_4) 和铌酸锂 LN (LiNbO_3) 是两种传统的电光晶体, 技术成熟, 已广泛应用于电光调 Q 激光器。但是, 因其存在驱动电压较高、压电振铃效应明显等缺点, 无法获得高重复频率激光输出。为了提高激光器的重复频率, 磷酸钛氧铷 RTP (RbTiOPO_4)、偏硼酸钡 BBO ($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$)、硅酸镓镧 LGS ($\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_4$) 和锆钛酸铅镧陶瓷 PLZT [$(\text{Pb}, \text{La})(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$] 等新型电光晶体逐渐代替传统电光晶体应用于高重复频率激光器。其实验数据表明, 新型电光晶体在提高重复频率方面有出色的表现^[12]。

1.1.1 KD*P 电光调 Q 激光器

KD*P 电光系数高, 作为电光调 Q 元件, 其技术成熟, 已经被广泛应用。但是 KD*P 驱动电压较高, 限制了激光器重复频率的提高^[13]。KD*P 电光调 Q 开关往往应用于重复频率为 1 kHz 及低于 1 kHz 的激光器中。

2012 年, 毛小洁等^[14]利用 LD 端面泵浦 Nd:YAG 增益介质, KD*P 普克尔盒作为电光调 Q 开关, 在重复频率为 1 kHz 的条件下, 获得单脉冲能量 2.7 mJ、脉冲宽度 5 ns 的激光输出。

2018 年, 万玮华等^[13]采用了一种新型 LD 端面泵浦结构, 利用三柱透镜耦合系统将泵浦光有效聚焦于 Nd:YAG 激光晶体, 提高泵浦光的吸收效率, 获得较大功率激光输出。在 KD*P 普克尔盒作为电光调 Q 开关、重复频率为 1 kHz 的条件下, 最终获得单脉冲能量 11 mJ 的激光输出。

1.1.2 LN 电光调 Q 激光器

LN 晶体是少数已被实际应用的电光晶体之一, 其具有电光系数大、传输光谱范围广、插入损耗低、在空气中不潮解等优点。除此之外, LN 晶体可以在宽温度范围内稳定运行。然而, 传统块状 LN 晶体的压电振铃效应严重, 使其重复频率不超过 1 kHz。

2018 年, 商继芳等^[10]研究了不同尺寸的 LN 电光晶体存在的压电振铃效应差异。实验表明, 传统块状 LN 电光晶体的压电振铃效应严重, 限制 LN 电光晶体只能在 1 kHz 重频下使用。小尺寸 LN 晶体作为电光调 Q 开关应用于激光器中, 压电振铃效应基本可以忽略。低驱动电压和小尺寸 LN 电光调 Q 开关结合, 最终获得重复频率 15 kHz、单脉冲能量 238 μJ 、脉宽 5.4 ns 的激光输出。

1.1.3 RTP 电光调 Q 激光器

RTP 晶体电学性能与光学性能优异, 具有较高的电阻率和抗光损伤阈值; 驱动电压低, 易于控制; 晶体不易潮解, 可以长期承受外加电压; 晶体可以在高重复频率下工作, 电信号高达 60 kHz 时也不会出现诱导电压效应。最新资料表明, 北京中以锐科光电技术有限公司生产的 RTP 电光开关, 最高开关频率可达 1 MHz^[15]。RTP 电光开关由两块性能完全一致的晶体相互旋转 90°组合而成, 用以补偿 RTP 晶体的自然双折射效应^[12]。

2000 年, LEBIUSH E 等^[16]在 Nd:YVO₄ 激光器中, 采用两块 RTP 晶体作电光调 Q 开关, 获得最高重复频率 75 kHz、最窄脉宽 8.4 ns 的激光输出。此激光器是高重频电光调 Q 激光器实验方面的代表性成果。

2010 年, 于欣等^[17]利用 LD 端面泵浦 Nd:GdVO₄, RTP 普克尔盒作为电光调 Q 开关, 获得重复频率

100 kHz、单脉冲能量 79 μJ 、脉冲宽度 20.2 ns 的脉冲激光输出，对应的光-光转换效率为 32.5%。电光调 Q 激光器示意图如图 1 所示。

2018 年，胡星等^[18]利用 RTP 晶体对作为电光调 Q 元件，采用低吸收系数的 914 nm 波长泵浦 Nd:YVO₄ 减小激光晶体热效应。在重复频率为 200 kHz 时，获得了单脉冲能量 80 μJ 、脉宽 9 ns 的激光输出。

1.1.4 BBO 电光调 Q 激光器

BBO 晶体具有优异的物理特性和光学特性，利用 BBO 晶体制成的电光开关具有高消光比、高损伤阈值、吸收损耗较低、压电振铃效应较小等优点，广泛应用于高重频激光器系统中^[12]。BBO 电光调 Q 开关基于横向电光效应实现对晶体折射率的调制，因此，可以通过改变 BBO 晶体的纵横比有效降低驱动电压。目前，国内福建福晶科技开发的 BBO 普克尔盒，重复频率最大可达 1 MHz^[19]。

2003 年，杜可明等^[20]利用激光二极管部分端面泵浦板条 Nd:YVO₄ 来降低激光晶体的热负荷，采用 BBO 晶体进行电光调 Q。在重复频率为 10 kHz 时，获得了单脉冲能量 5.6 mJ、脉宽 6.5 ns 的激光输出；在重复频率为 50 kHz 时，获得了单脉冲能量 1.66 mJ、脉宽 11.3 ns 的激光输出。

2008 年，李小莉等^[21]同样利用部分端面抽运混合腔 Nd:YVO₄ 板条激光器，在重复频率为 25 kHz 时，获得了单脉冲能量 1.2 mJ、脉冲宽度 9.5 ns 的激光输出。实验结果表明，输出激光参数还有很大提升空间。电光调 Q 装置示意图如图 2 所示。

2017 年，赵鹏等^[22]利用 888 nm 端面抽运 Nd:YVO₄ 增益介质，采用 BBO 电光开关进行电光调 Q，获得 500 kHz 的高重频激光输出。

1.1.5 LGS 电光调 Q 激光器

LGS 晶体具有稳定的理化特性，损伤阈值高、热稳定性高、机电耦合系数高。但是 LGS 晶体具有旋光性，在采取措施消除晶体的旋光效应后，作为电光开关的 LGS 晶体表现出优异的性能。当 LGS 晶体利用横向电光效应制作电光开关时，与 BBO 晶体相同，可通过调节 LGS 晶体的纵横比来调节驱动电压^[23]。最新资料表明，安徽科瑞思创晶体材料有限公司生产的 LGS 电光调 Q 开关最高重复频率可达 1 MHz^[24]。

2010 年，唐昊等^[25]利用 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄，采用 LGS 普克尔盒作为电光调 Q 开关，在重复频率为 30 kHz 时，获得单脉冲能量 200 μJ 、脉宽 9.1 ns 的激光输出。电光调 Q 晶体 LGS 纵横比为 10:1，四分之一波电压仅为 1760 V，低驱动电压有利于获得高重复频率激光输出。高重复率电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器装置图如图 3 所示。

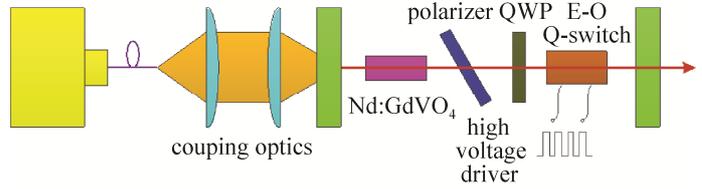


图 1 电光调 Q 激光器示意图^[17]
Fig. 1 Schematic diagram of electro-optic Q-switched laser

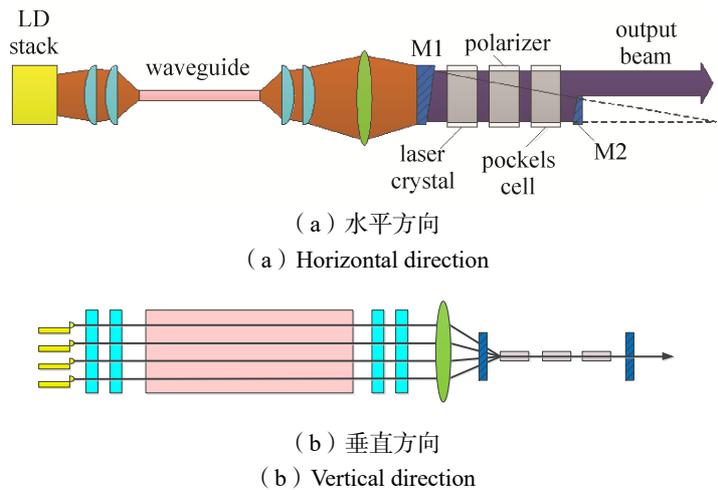


图 2 电光调 Q 装置示意图^[21]
Fig. 2 Electro-optical Q-switched experimental setup

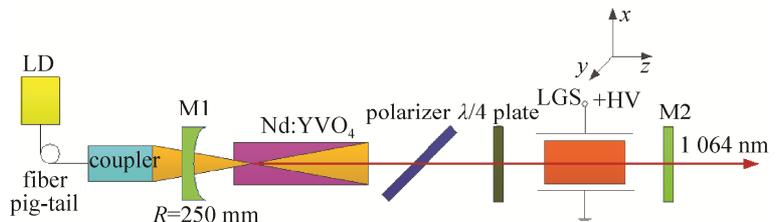


图 3 高重复率电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器装置图^[25]
Fig. 3 Schematic diagram of high repetition rate electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser

2016 年, 马世会等^[26]在解决 LGS 旋光效应的基础上, 利用 LGS 设计了单次通过新型短腔的激光结构并取得了良好的激光性能, 获得重复频率 200 kHz、脉宽 5.1 ns 的 1 064 nm 激光输出。

1.1.6 光学陶瓷电光调 Q 激光器

光学陶瓷是一类具有电光效应的陶瓷材料, 其电轴状态随光学性质的改变而发生变化, 可通过外加电场对光学陶瓷的电轴状态进行控制。光学陶瓷材料在高电光效应、宽传输波长范围、低光损耗、快速响应速度和陶瓷坚固性等方面具有优越的性能^[12,27]。

1998 年, WANG G Y 等^[28]利用 PLZT[(Pb,La)(Zr,Ti)O₃]光学陶瓷作为电光调 Q 开关, 在重复频率为 10 kHz 时, 获得了单脉冲能量 11 μJ、脉冲宽度 14 ns 的激光输出。由于 PLZT 电光系数较大, 在 Nd:YVO₄ 激光器中驱动电压仅为 300 V, 不仅降低了对驱动源的要求, 还缩减了包装尺寸和激光成本。

2005 年, ZOU Y K 等^[29]利用 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄, 利用 PMN-PT[Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃-PbTiO₃]光学陶瓷进行了电光调 Q 的实验研究。PMN-PT 光学陶瓷相对于其他驱动电压高达几千伏的电光开关而言, 所需驱动电压低至几十伏特。谐振腔采用平凹腔, 腔内 PMN-PT 光轴与 Nd:YVO₄ 的 c 轴夹角为 45°, 输出镜透过率为 90%。在驱动电压为 48 V 时, 获得了重复频率 200 kHz、脉宽 13 ns 的激光输出。

2013 年, 李佳^[30]利用 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄, 掺铍 PLZT 作为电光调 Q 元件, 获得重复频率 300 kHz 的激光输出。实验表明, 掺铍 PLZT 不仅可以作为电光调 Q 元件, 还具有光放大效应。兼顾激光增益介质与电光调 Q 双重作用的掺铍 PLZT 应用于激光器中, 将简化激光器的构成结构, 在制作小型化调 Q 激光器方面将会有广阔的应用前景。

1.2 电光偏转器

电光偏转器调 Q 的工作原理是依据晶体的电光效应, 通过在电光偏转器电极之间施加电势差, 线性电场梯度使电光偏转晶体产生垂直于激光传输方向的线性折射率梯度, 从而引发激光光束传输方向发生偏转。电光偏转器的响应速度快, 可达纳秒量级, 具有结构简单、低插入损耗、低驱动电压、体积小、易于控制和灵敏度高等优点^[31,32]。电光偏转调 Q 激光器示意图如图 4 所示。

1998 年, FRIEL G J 等^[32]利用 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄, 采用电光偏转器调 Q 技术获得了重复频率 20 kHz、单脉冲能量 10.5 μJ、脉冲宽度 1.5 ns 的高重频窄脉宽激光输出。这是电光偏转器应用于调 Q 激光器的第一次报道。

2007 年, HORIUCHI R 等^[33]利用 LD 端面泵浦 Nd:GdVO₄, 采用电光偏转器调 Q 技术, 获得重复频率 200 kHz、单脉冲能量 6.5 μJ、脉冲宽度 10 ns 的激光输出。该文献作者指出, 最大重复频率受高压持续时间的限制, 如果延长周期, 则重复频率可进一步提高。2008 年, 该课题组 HORIUCHI R 等^[34]利用 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄, 采用电光偏转器调 Q 技术, 获得了重复频率 1.4 MHz、单脉冲能量 1.92 μJ、脉冲宽度 39 ns 的激光输出。

2016 年, 王旭等^[31]利用 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄, 采用 RTP 电光偏转器作为调 Q 开关, 获得最高重复频率 20 kHz、单脉冲能量 133.5 μJ、脉冲宽度 2.2 ns 的激光输出。

1.3 激光增益介质

目前, 全固态电光调 Q 激光器中, 1 μm 激光波长常用的增益介质有 Nd:YAG、Nd:YVO₄、Nd:GdVO₄、Yb:YAG 和 Nd:YLF 等; 其他激光波长常用的增益介质有 Er:YAG、Tm:YAP 和 Tm:YAG 等。其中, Nd:YAG 和 Er:YAG 的上能级荧光寿命为 230 μs, Nd:YLF 的上能级荧光寿命为 485 μs, Tm:YAP 和 Tm:YAG 的上能级荧光寿命分别为 4.4 ms 和 13.9 ms, 较长的上能级荧光寿命限制了电光调 Q 激光器重复频率的提高。

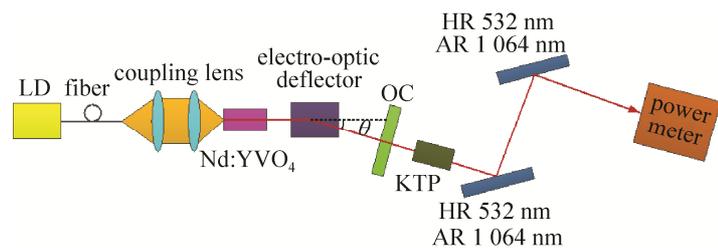


图 4 电光偏转调 Q 激光器示意图^[31]
Fig. 4 Schematic diagram of electro-optic deflection Q-switched laser

而 Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 两种增益介质的上能级荧光寿命较短 (90 μs), 往往应用于高重复频率电光调 Q 激光器中。除此之外, Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 两种增益介质受激发射截面较大, 泵浦吸收系数较高, 使得激光器在高重复频率运转下可以获得较高增益激光输出^[9,35]。

2011年, KIM J W 等^[36]利用 1 532 nm 带内泵浦 Er:YAG 增益介质, 采用 RTP 普克尔盒作为电光调 Q 开关。在重复频率为 20 Hz 时, 获得最大单脉冲能量 30.5 mJ、脉冲宽度 20 ns 的激光输出; 在重复频率为 30 Hz 时, 获得单脉冲能量 23 mJ、脉冲宽度 53 ns 的激光输出; 在重复频率为 2.5 kHz 时, 获得单脉冲能量 4.5 mJ、脉冲宽度 110 ns 的 1 617 nm 激光输出。

2012年, CHANG L 等^[37]首次利用 885 nm 端面泵浦 Nd:YAG, 采用 BBO 普克尔盒作为电光调 Q 开关。在重复频率为 2 kHz 时, 获得最大单脉冲能量 5.1 mJ、最短脉宽 14.5 ns 的激光输出; 在重复频率为 10 kHz 时, 获得最大输出平均功率 22.7 W 的 1 064 nm 激光输出。

2016年, JIN L 等^[38]利用 LD 端面泵浦 Tm:YAG 增益介质, 采用 RTP 普克尔盒作为电光调 Q 开关。在重复频率为 1 kHz 时, 获得了单脉冲能量 7.5 mJ、脉冲宽度 58 ns 的 2 μm 激光输出。

2016年, 张子龙等^[39]首次利用 880 nm 端面泵浦 Nd:YLF 激光晶体, 采用 RTP 普克尔盒作为电光调 Q 开关, V 型腔结构设计使激光器小型化。在重复频率为 1 kHz 时, 获得单脉冲能量 9.5 mJ、脉冲宽度 9.5 ns 的 1 047 nm 激光输出。

2019年, 高倩等^[40]首次利用 LD 部分端面抽运混合腔 Yb:YAG 板条, 采用 BBO 普克尔盒作为电光调 Q 开关。在重复频率为 2 kHz 时, 获得单脉冲能量 14.6 mJ、脉冲宽度 30 ns 的 1 030 nm 激光输出。

2020年, WEN Y 等^[41]利用 LD 双端面泵浦 Tm:YAP, 采用 RTP 普克尔盒作为电光调 Q 开关, 谐振腔采用布拉格光栅作为腔镜获得窄线宽激光输出。在重复频率为 10 kHz 的条件下, 获得了单脉冲能量 2.2 mJ、脉冲宽度 20.64 ns 的 1 937.87 nm 激光输出。

2012年, 刘瑞等^[7]利用生长型复合 Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 晶体作为激光增益介质进行对比实验, RTP 电光晶体作为调 Q 开关, 两台激光器均可以获得最高重复频率 150 kHz 的基横模激光输出。其实验表明, 在低泵浦功率下, 具有更大发射截面的 Nd:YVO₄ 晶体更容易在高重复频率电光调 Q 条件下运转; 在高泵浦功率下, 相比于复合 Nd:YVO₄ 晶体, 具有

更出色热传导性能的复合 Nd:GdVO₄ 晶体更容易获得高重复频率激光输出。实验装置示意图如图 5 所示。

综上所述, 电光调 Q 激光器获得高重复频率激光输出, 其核心部件为电光调 Q 开关。KD*P 电光调 Q 开关对应输出重复频率往往低于 1 kHz。缩小 LN 电光晶体尺寸可削弱压电振铃效应, 提高重复频率。新型电光晶体 RTP、BBO、LGS 的应用, 使重复频率提高至百赫兹量级。光学陶瓷材料能产生较大的二次电光效应, 其作为电光调 Q 开关的发展潜力也不容忽视。电光偏转调 Q 开关的出现将重复频率提升至兆赫兹量级, 进一步提高了激光器的重复频率。激光器的重复频率除了与电光调 Q 器件有关外, 还与增益介质有关。具有较短上能级寿命的 Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 可获得较高重复频率激光输出, Nd:GdVO₄ 晶体优异的热传导性能使其在高泵浦功率下更适合在高重复电光调 Q 下运转, 是一种十分有发展前景和应用潜力的增益介质。

2 电光调 Q 激光器的脉冲宽度

电光调 Q 技术属于快开关技术, 较快的响应速度使其本身可获得窄脉宽激光输出。根据 ZAYHOWSKI J J 等的电光调 Q 理论^[42]可知, 腔长和重复频率会影响激光器的脉冲宽度。在电光调 Q 快

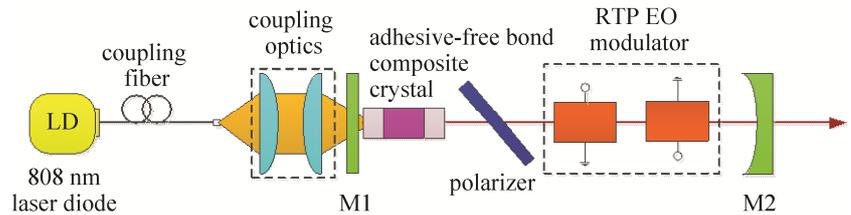


图 5 实验装置示意图^[7]

Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

开关速度基础上, 通过压缩腔长、降低重复频率可获得窄脉宽激光输出。为了在高重复频率条件下亦获得窄脉宽激光输出, 可利用电光腔倒空调 Q 技术, 该电光调 Q 技术输出脉冲宽度与重复频率无关。下面从电光调 Q 开关的快开关能力、短腔法和电光腔倒空技术三方面, 对高重频窄脉宽电光调 Q 激光器的发展进行综述。

2.1 快速电光调 Q 开关

电光调 Q 开关可以在谐振腔损耗非常大和非常小之间快速转换, 可以在 10^{-8} 秒内完成一次开关作用, 是一种产生窄脉宽激光的有效方法, 脉冲宽度在纳秒量级, 很容易获得 10 ns 以下的稳定脉冲输出^[12]。

2010 年, 唐昊等^[25]利用 LD 端面连续泵浦 Nd:YVO₄ 晶体, LGS 普克尔盒作为电光调 Q 开关, 设计高效稳定谐振腔, 获得了重复频率 30 kHz、脉冲宽度 9.1 ns 的激光输出。

2019 年, 胡星等^[18]利用 LD 端面连续泵浦 Nd:YVO₄ 晶体, 采用 RTP 晶体对作为电光调 Q 元件, 通过减小热效应和模式匹配技术, 在重复频率为 200 kHz 时, 获得了脉冲宽度 9 ns 的高重频窄脉宽稳定激光输出。

2020 年, 赵鑫等^[43]利用 LD 抽运 Nd:YVO₄ 晶体, 由最佳电压驱动电光普克尔盒, 获得重复频率 1 kHz、脉冲宽度 0.77 ns 的窄脉宽激光输出。

2.2 短腔法

根据 ZAYHOWSKI J J^[42]等的电光调 Q 理论分析可知, 当激光晶体、泵浦功率、振荡激光光斑尺寸和重复频率确定时, 谐振腔长度越短, 脉冲宽度越窄^[29]。为获得窄脉宽激光输出, 可通过缩小光学元件的尺寸或者采用退压式电光调 Q 等方式减少腔内光学元件, 进一步压缩谐振腔腔长, 获得窄脉宽激光输出。

2010 年, 张赟坤等^[44]利用 LD 端面泵浦带有 10° 楔角的 Nd:YVO₄ 晶体, 采用 LGS 晶体作为电光调 Q 元件, 获得效率高、脉宽窄、结构紧凑的小型化激光器。增益介质采用带有楔角的 Nd:YVO₄ 晶体代替检偏器, 具有简化腔内元件、缩短腔长、降低损耗的优点, 有利于提高输出激光的转换效率和窄脉宽激光输出性能。实验最终获得重复频率 1 kHz、单脉冲能量 2.2 mJ、脉冲宽度 6.3 ns 的激光输出。

2018 年, 商继芳等^[10]研制了一种基于 LN 电光调 Q 的高重复频率窄脉宽短腔激光器。激光增益介质采用具有较大受激发射截面和较短荧光寿命的 Nd:YVO₄ 晶体, 激光晶体泵浦端面镀有 1 064 nm 全反膜代替后腔镜, 另一端沿布儒斯特角切割代替偏振片, 缩短了腔长。采用退压式电光调 Q 方式, 省去了四分之一波片, 进一步缩短腔长。设计的激光器谐振腔长度仅为 20 mm, 获得了最大重复频率 15 kHz、单脉冲能量 238 μJ、脉宽 5.4 ns 的稳定激光输出。紧凑型电光调 Q 激光器示意图如图 6 所示。

电光调 Q 短腔法获得窄脉宽激光输出, 往往通过增益介质端面镀膜代替腔镜和另一端面以布儒斯特角切割代替偏振片来压缩腔长, 采用退压式电光调 Q 方式则可以省去四分之一波片, 进一步压缩腔长。其中, 相比于电光晶体调 Q 方式, 采用电光偏转器调 Q 使谐振腔内除偏转器外, 无需增加其他任何腔内元件即可实现调 Q 运转, 有效压缩腔长, 减小插入损耗, 易于获得窄脉宽激光输出^[31]。

2016 年, 王旭等^[31]利用 LD 连续端面泵浦 Nd:YVO₄ 激光晶体, 采用四电极结构 RTP 电光偏转器作为调 Q 开关获得窄脉宽激光输出。当重复频率为 5 kHz 时, 获得了单脉冲能量 244 μJ、脉冲宽度 1.0 ns 的调 Q 脉冲输出; 在重复频率为 20 kHz 时, 获得了单脉冲能量 134 μJ、脉冲宽度 2.2 ns 的调 Q 脉冲输出。相比于电光晶体调 Q 激光器, 利用电光偏转器调 Q 缩短了腔长, 获得高重频窄脉宽激光输出, 使激光器结构更为紧凑。

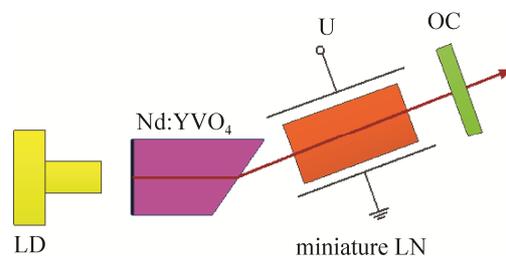


图 6 紧凑型电光调 Q 激光器示意图^[10]

Fig. 6 Schematic diagram of compact electro-optic Q-switched laser

2.3 电光腔倒空

根据 ZAYHOWSKI J J 等^[42]的电光调 Q 理论分析可知, 激光脉冲宽度受重复频率限制, 传统电光调 Q 技术获得激光脉冲宽度随重复频率提高而明显加宽。电光腔倒空技术是一种用于产生高重复窄脉宽的特殊调 Q 技术。一般电光调 Q 激光器的储能单元为激光增益介质, 而电光腔倒空的储能单元为谐振腔, 使得电光腔倒空激光器获得激光脉宽与重复频率无关, 只与谐振腔腔长和调 Q 开关速度有关。理论上来说, 只要调 Q 开关的开关速度足够快, 电光腔倒空激光器获得的脉冲宽度就等于振荡激光在腔内的往返渡越时间^[45]。

2006 年, MCDONAGH L 等^[46]进行了电光腔倒空技术与传统电光调 Q 技术的对比实验。实验采用 888 nm LD 端面泵浦 Nd:YVO₄, BBO 作为电光调 Q 开关。采用传统电光调 Q 技术, 脉宽从重复频率为 20 kHz 条件下的 15 ns 变为重复频率为 100 kHz 条件下的 45 ns; 然而, 利用电光腔倒空技术在不同重频下, 脉宽稳定在 6±0.2 ns。利用电光腔倒空技术, 最终获得重复频率 100 kHz、脉宽 6 ns 的激光输出。

2014 年, 石朝辉等^[45]利用 LD 输出 880 nm 泵浦波长直接抽运 Nd:YVO₄, 有效降低晶体的热效应, 采用 BBO 晶体作为电光腔倒空的调 Q 元件。通过优化谐

振腔, 使激光器在宽泵浦范围保持稳定, 提高泵浦光与振荡光的模式匹配。在重复频率为 500 kHz 的条件下, 获得单脉冲能量 20 μJ、脉冲宽度 6 ns 的稳定激光输出。电光腔倒空激光器结构示意图如图 7 所示。

综上所述, 电光调 Q 激光器获得高重复窄脉宽激光输出, 在电光调 Q 开关快速关通能力的基础上, 通过压缩腔长可获得窄脉宽激光输出。压缩腔长往往通过增益介质端面镀膜代替腔镜, 以及增益介质另一端以布儒斯特角切割代替偏振片来进行, 而采用退压式电光调 Q 可去除四分之一波片, 进一步压缩腔长。采用电光偏转器调 Q 使谐振腔内除偏转器外, 无需增加其他任何腔内元件即可实现调 Q 运转, 有效压缩腔长, 减小插入损耗, 更容易获得窄脉宽激光输出。然而提高重复频率, 脉冲宽度会相应展宽, 利用电光腔倒空调 Q 输出脉冲宽度与重复频率无关的特性, 可获得更高重复频率窄脉宽激光输出。

3 电光调 Q 激光器的单脉冲能量

通过以上介绍, 单激光棒电光调 Q 振荡器可获得高重频、窄脉宽激光输出。然而, 此类振荡器输出的激光单脉冲能量通常较低, 限制了其在许多领域的应用。为了获得较大单脉冲能量激光输出, 可以在振荡器内增加增益介质的个数, 即在振荡器内采用双棒串接技术可提高振荡器的输出能量。除此之外, 为了获得大能量激光输出, 在振荡器外应用主振荡功率放大技术 MOPA (Master Oscillator Power Amplifier), 可获得高重频、窄脉宽、大能量激光输出。下面从双棒串接技术和主振荡功率放大技术两方面, 对高重频大能量电光调 Q 激光器的发展进行综述。

3.1 双棒串接技术

由于热效应导致激光晶体产生折射率梯度的变化, 会严重影响激光的模式分布和大能量激光输出。为了获得高重复频率、高增益和基横模输出, 就要避免高泵浦下激光晶体的热效应。为了降低激光晶体内的热效应和热致折射率梯度变化, 提高激光的输出能量, 往往在谐振腔内采用多个激光晶体组合, 特别是在谐振腔内采用双棒激光晶体组合获得大能量激光输出。在相同泵浦情况下, 与单棒激光器相比, 双棒激光器还可扩大稳区范围^[47]。

2014 年, 沈兆国等^[48]为获得高重频窄脉宽大能量激光输出, 采用双棒串接技术, 获得百瓦量级激

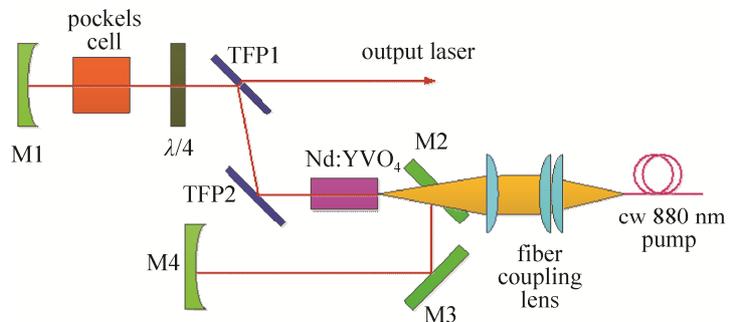


图 7 电光腔倒空激光器结构示意图^[45]
Fig. 7 Schematic diagram of electro-optical cavity-dumped laser structure

光输出。采用 LD 侧面泵浦两块完全相同的 Nd:YAG, LN 普克尔盒作为调 Q 元件, 获得重复频率 10 kHz、脉冲宽度 5 ns、单脉冲能量 24 mJ 的大能量激光输出。

2018 年, 周丹丹等^[49]采用电光调 Q 技术和双棒串接结构, 利用低吸收系数的 914 nm 泵浦光抽运两块 Nd:YVO₄ 晶体, 提高了激光器的热稳定性。在 BBO 晶体作为电光开关、重复频率为 7 kHz 的条件下, 获得了脉冲宽度 5 ns、单脉冲能量 5 mJ 的稳定脉冲激光输出。双棒串接激光器示意图如图 8 所示。

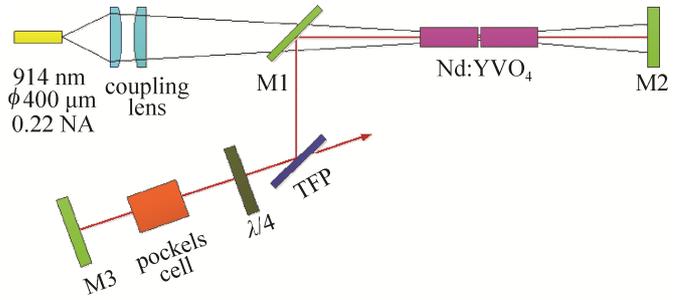


图 8 双棒串接激光器示意图^[49]

Fig. 8 Schematic diagram of double rod series laser

3.2 主振荡功率放大技术

主振荡功率放大器主要包括两部分: 首先, 主振荡器产生具有高光束质量的种子光源, 输出功率可大可小; 然后, 经过一级或多级功率放大器, 实现对种子光源的高功率放大。因此, 采用主振荡功率放大技术获得激光输出, 不仅可以保证输出激光具有较高的光束质量, 同时可放大激光输出能量, 即它结合了低功率种子光源的高光束质量和功率放大器的激光能量放大的优点^[50]。

主振荡功率放大器主要包括两部分: 首先, 主振荡器产生具有高光束质量的种子光源, 输出功率可大可小; 然后, 经过一级或多级功率放大器, 实现对种子光源的高功率放大。因此, 采用主振荡功率放大技术获得激光输出, 不仅可以保证输出激光具有较高的光束质量, 同时可放大激光输出能量, 即它结合了低功率种子光源的高光束质量和功率放大器的激光能量放大的优点^[50]。

3.2.1 固体棒状放大技术

固体棒状激光晶体具有良好的均匀性和对称性, 适应于多种泵浦方式, 可使泵浦光与振荡光实现良好的模式匹配, 依然是使用最广泛的增益介质。研究证明, 棒状激光晶体在高效的热控制情况下, 可使激光器获得高功率、高光束质量的激光输出^[50]。目前, 固体棒状激光晶体依然是主振荡功率放大器中广泛应用的增益介质。

2018 年, 陆俊等^[5]研制了一台基于 Nd:YVO₄ 晶体的高效率、结构紧凑的双波长激光器。该激光系统采用主振荡功率放大结构, 振荡级采用 808 nm 端面泵浦 Nd:YVO₄, BBO 作为电光调 Q 开关获得重复频率 5 kHz、单脉冲能量 400 μJ、脉冲宽度 1.1 ns 的 1 064 nm 基横模输出。放大级采用 878.6 nm 直接泵浦 Nd:YVO₄ 两级放大, 获得单脉冲能量 2.72 mJ、脉冲宽度 1.03 ns 的基频光输出。通过 LBO 腔外倍频, 获得了重复频率 5 kHz、单脉冲能量 1.54 mJ、脉宽 910 ps 的 532 nm 激光和重复频率 5 kHz、单脉冲能量 1.18 mJ、脉宽 1.1 ns 的 1 064 nm 激光的双波长激光脉冲输出。MOPA 光学原理图如图 9 所示。Nd:YVO₄ 级联放大器光学原理图如图 10 所示。

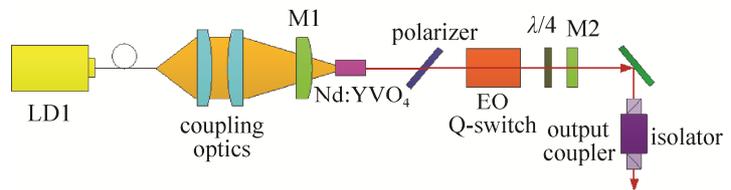


图 9 MOPA 光学原理图^[5]

Fig. 9 Optical schematic of MOPA

3.2.2 固体板条放大技术

激光器采用固体棒状主振荡-功率放大技术, 通常在采用单级多通、多级单通、多级多通等多次通过的放大系统中, 随着种子激光功率不断被放大, 其光斑半径变化较小, 导致峰值功率密度不断增加, 过高的激光峰值功率密度容易造成光学元器件的损伤。在激光二极管部分端面泵浦混合腔板条激光器 (Innoslab laser) 放大技术中, 种子激光往返通过板条放大增益介质, 在激光能量被放大的同时, 激光光斑尺寸同样被放大, 使激光在放大

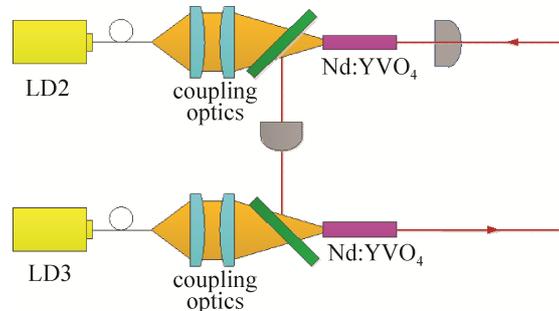


图 10 Nd:YVO₄ 级联放大器光学原理图^[5]

Fig. 10 Optical schematic of Nd:YVO₄ cascade amplifier

过程中峰值功率密度不至于过高而导致光学元器件损伤。由振荡器输出的高重复、低能量种子激光, 经过设计合理的结构, 利用 Innoslab 激光放大技术可获得大能量激光输出^[51]。

2017年, 毛叶飞等^[52]采用 Innoslab 激光放大技术获得重复频率 5 kHz、单脉冲能量 25 mJ、脉冲宽度 3 ns 的激光输出。种子源为电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器, 获得重复频率 5 kHz、单脉冲能量 0.3 mJ 的种子光。放大级采用掺杂浓度为 0.6% 的 Nd:YAG 板条晶体, 尺寸为 40 mm×14 mm×1 mm。种子激光经过 12 程放大, 最终获得单脉冲能量 25 mJ、输出功率 125 W 的放大激光输出。Innoslab 放大器示意图如图 11 所示。

2020年, JAVED F 等^[53]报道了一台高平均功率、高重复、窄脉宽的激光器。种子源为电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器, 获得重复频率 100 kHz、单脉冲能量 400 μJ、平均功率 40 W 的种子光。采用 Innoslab 放大技术, 放大级增益介质为掺杂浓度 0.6% 的 Nd:YAG

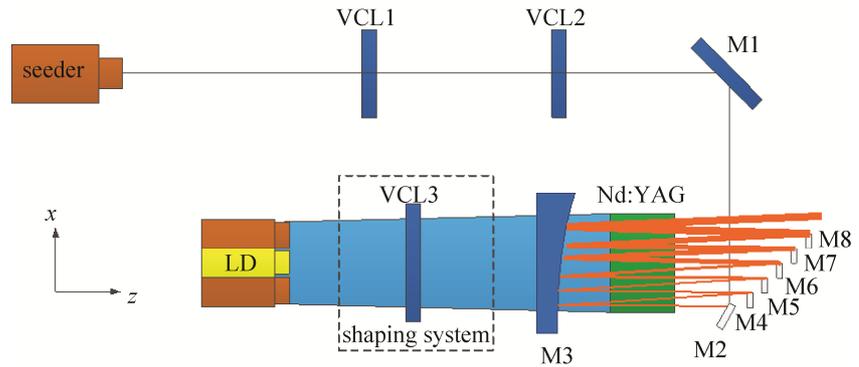


图 11 Innoslab 放大器示意图^[52]
Fig. 11 Innoslab amplifier schematic

板条晶体, 尺寸为 40 mm×14 mm×1.4 mm。放大级通过七通放大将种子光有效放大, 最终获得重复频率 100 kHz、单脉冲能量 2.1 mJ、输出功率 210 W 的放大激光输出。

综上所述, 电光调 Q 激光器要获得高重复大能量激光输出, 主要通过增加振荡器内的增益介质数量, 或者在振荡器外采用主振荡功率放大技术来实现。双棒串接结构可以有效降低激光晶体内的热效应, 提高激光脉冲能量输出。在此基础上, 若泵浦方式采用带内直接泵浦, 双棒激光晶体采用键合晶体, 将进一步降低激光晶体的热负荷, 获得大能量激光输出。采用主振荡功率放大技术是获取大能量激光输出的有效手段, 固体棒状放大技术是主振荡功率放大技术的经典方式。为了防止放大激光峰值功率密度过高导致光学元件损坏, 固体板条放大技术应运而生, 进一步提高了激光器的输出能量。

4 结束语

全固态高重复电光调 Q 激光器是固体激光器的一个重要分支, 具有远大的发展前景和无穷的应用潜力。据目前报道的激光器指标参数, 电光晶体调 Q 激光器的重复频率已达百赫兹量级。随着电光晶体性能的逐渐完善, 预期激光器的重复频率会有更大的提高。电光偏转器调 Q 激光器使重复频率提高至兆赫兹量级, 但是国内电光偏转器发展还不够成熟, 获得的重复频率低于国外指标。除了电光调 Q 元件外, 增益介质亦会影响激光器的重复频率。目前, 全固态高重复电光调 Q 激光器主要采用 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄, 而 Nd:GdVO₄ 同样具有较短的上能级寿命, 并且热传导特性优于 Nd:YVO₄, 因此将来有可能超越 Nd:YVO₄ 成为高重复电光调 Q 的主要增益介质。电光调 Q 开关的快速响应速度使其可获得纳秒级窄脉宽激光输出, 采用短腔法可进一步压窄脉宽, 但是脉冲宽度随重复频率的提高会相应展宽。而采用电光腔倒空调 Q 技术则可以在高重复频率下获得窄脉宽激光输出, 脉冲宽度与重复频率无关。单棒电光调 Q 振荡器可获得高重复窄脉宽激光输出, 但由于其对超短谐振腔及优异光束质量的依赖, 由振荡器输出的单脉冲能量通常较低, 为微焦量级。为了获得大能量激光输出, 通过振荡器内双晶体棒串接或者振荡器外采用主振荡功率放大技术, 可获得毫焦量级的大能量激光输出。为了获得稳定高重复窄脉宽大能量激光输出, 除了采用必要的结构或者激光放大方式之外, 对增益介质的材料特性、光学元件的损伤阈值等有了更高的要求。随着电光调 Q 元件可靠性技术不断提高、增益介质制备技术不断成熟、相关科学研究的不断深入与工业技术的不断发展, 全固态电光调 Q 激光器凭借其输出重复频率高、脉冲宽度窄、单脉冲能量大的优势, 将广泛应用于激光雷达、激光测距、激光精密加工和光通信等众多领域。

参考文献

- [1] 解慧明. LD 侧泵高功率全固态 532 nm、355 nm 激光器研究[D]. 西安: 西北大学, 2006.
XIE Huiming. Study of LD side pumped all-solid-state 532 nm、355 nm lasers[D]. Xi'an: Northwest University, 2006.
- [2] 姚建波. LD 侧面泵浦 355 nm 紫外激光器[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
YAO Jianbo. Ultraviolet laser of LD side-pumped at 355 nm[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.
- [3] 冯雪红. LD 端面泵浦全固态 355 nm 紫外脉冲激光器[D]. 西安: 西北大学, 2006.
FENG Xuehong. Study on LD pumped all-solid-state 355 nm ultraviolet laser[D]. Xi'an: Northwest University, 2006.
- [4] 刘瑞. LD 连续泵浦高重频电光调 Q 技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
LIU Rui. Research on LD continuous-pumped high repetition rate electro-optic Q-switch laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [5] 陆俊, 丁建永, 贺岩, 等. 机载激光雷达用高重复频率亚纳秒双波长全固态激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 27–33.
LU Jun, DING Jianyong, HE Yan, et al. High repetition rate sub-nanosecond dual-wavelength solid-state laser for airborne lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 27–33.
- [6] 屈鹏飞. 紧凑型高效能固体激光器关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
QU Pengfei. Study on key techniques of compact high efficiency end-pumped solid-state laser[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [7] 刘瑞, 于永吉, 陈薪羽, 等. 150 kHz 生长型复合 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 电光调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2012(6): 7–11.
LIU Rui, YU Yongji, CHEN Xinyu, et al. 150 kHz Q-switched adhesive-free bond composite Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012(6): 7–11.
- [8] 刘文字. 掺镱倍半氧化物固溶体混晶的生长及其光谱展宽性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
LIU Wenyu. Investigation on growth and spectral broadening properties of Yb³⁺ doped mixed sesquioxide crystals[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [9] 马欲飞. 全固态高重频窄脉宽 Nd:GdVO₄ 激光器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
MA Yufei. Research on all-solid-state Nd:GdVO₄ laser with high repetition rate and short pulse width[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [10] 商继芳, 孙军, 李清连, 等. 高重复频率铌酸锂电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器[J]. 光子学报, 2018,47(5): 7–14.
SHANG Jifang, SUN Jun, LI Qinglian, et al. High-repetition-rate LiNbO₃ electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2018,47(5): 7–14.
- [11] 王继扬, 郭永解, 李静, 等. 电光晶体研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(10): 49–57.
WANG Jiyang, GUO Yongjie, LI Jing, et al. Progress in electro-optic crystal research[J]. Materials China, 2010, 29(10): 49–57.
- [12] 朱小磊, 唐昊, 李小莉, 等. 高重复频率电光调 Q 全固态激光器研究进展[J]. 中国激光, 2009(7): 1654–1659.
ZHU Xiaolei, TANG Hao, LI Xiaoli, et al. Recent progresses of LD pumped solid state lasers with high repetition rate electro-optic Q-switch[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009(7): 1654–1659.
- [13] 万玮华, 仇振安, 郝培育, 等. 一种 kHz、窄脉宽、高能量激光器的研究[J]. 电光与控制, 2018,25(4): 74–77,91.
WAN Weihua, QIU Zhenan, HAO Peiyu, et al. A kHz and high-energy laser device with narrow pulse width[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(4): 74–77, 91.
- [14] 毛小洁, 秘国江, 杨文是, 等. 二极管端面抽运千赫兹激光器[J]. 激光技术, 2012, 36(5): 639–641.
MAO Xiaojie, MI Guojiang, YANG Wenshi, et al. Diode end-pumped lasers with 1 kHz pulse repetition rate[J]. Laser Technology, 2012, 36(5): 639–641.
- [15] 北京中以锐科光电技术有限公司. RTP 晶体电光器件[EB/OL]. [2021-01-18].<http://www.lingoptics.com/webcontent/default.asp?pageID=36&ID=661>.
- [16] LEBIUSH E, LAVI R, TZUK Y, et al. High repetition rate end-pumped electro-optic RTP Q-switch Nd:YVO₄ laser[C]// IEEE Conference Digest. 2000 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (Cat. No. 00TH8505), 2000.
- [17] YU X, WANG C, CHEN F, et al. Comparison of electro-optical and acousto-optical Q-switched, high repetition rate

- Nd:GdVO₄ laser[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(3): 442–445.
- [18] 胡星, 程德江, 郭芷妍, 等. 914 nm LD泵浦 RTP电光调Q的高效率Nd:YVO₄激光器[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 72–76.
HU Xing, CHENG Dejiang, GUO Zhiyan, et al. Highly efficient RTP electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser by end-pumping at 914 nm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 72–76.
- [19] 福建福晶科技股份有限公司. BBO普克尔盒[EB/OL]. [2021-02-02]. <http://gb.castech.com/product/120.html>.
- [20] DU K M, LI D J, ZHANG H L, et al. Electro-optically Q-switched Nd:YVO₄ slab laser with a high repetition rate and a short pulse width[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(2): 87–89.
- [21] 李小莉, 邵杰, 臧华国, 等. 高重复率窄脉宽Nd:YVO₄板条激光器[J]. *中国激光*, 2008(2): 206–210.
LI Xiaoli, SHAO Jie, ZANG Huaguo, et al. High repetition rate short pulse width Nd:YVO₄ slab laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008(2): 206–210.
- [22] 赵鹏, 陈檬, 禹伶洁, 等. 百千赫兹皮秒再生放大器的输出特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 170–174.
ZHAO Peng, CHEN Meng, YU Lingjie, et al. Output characteristics of few hundreds kHz picosecond regenerative amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 170–174.
- [23] 王继扬, 尹鑫, 张少军, 等. 硅酸镓镧单晶的生长、性质及电光应用的研究[J]. *物理学进展*, 2007(3): 344–360.
WANG Jiyang, YIN Xin, ZHANG Shaojun, et al. Growth, property and electro-optical application of lagasite crystal[J]. *Progress in Physics*, 2007(3): 344–360.
- [24] 安徽科瑞思创晶体材料有限责任公司. LGS电光开关[EB/OL]. [2021-02-02]. <http://www.crystro.cn/display/267221.html>
- [25] 唐昊, 朱小磊, 孟俊清, 等. 高重复频率窄脉宽LGS电光调Q Nd:YVO₄激光器[J]. *光学学报*, 2010(1): 145–149.
TANG Hao, ZHU Xiaolei, MENG Junqing, et al. High repetition rate short pulse width LGS electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010(1): 145–149.
- [26] 马世会, 于浩海, 张怀金, 等. LGS电光调Q光开关的设计及脉冲激光性能表征[A]. *中国晶体学会*, 2016: 1.
MA Shihui, YU Haohai, ZHANG Huaijin, et al. Design of LGS electro-optical Q-switched optical switch and characterization of pulsed laser performance[A]. *Chinese Crystallographic Society*, 2016: 1.
- [27] JIANG H, ZOU Y K, CHEN Q, et al. Transparent electro-optic ceramics and devices[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2005, 5644.
- [28] WANG G Y, JIANG H, ZHAO J, et al. Low-voltage electro-optic Q switching of 1.06 μm microlasers by PLZT[C]// *Conference on Lasers & Electro-optics*. IEEE, 2002.
- [29] ZOU Y K, CHEN Q S, ZHANG R, et al. Low voltage, high repetition rate electro-optic Q-switch[C]// *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2005. IEEE, 2005, 2: 1094–1096.
- [30] 李佳. 基于钽掺杂PLZT电光陶瓷复合腔多功能激光器特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LI Jia. The characteristics of composite multifunctional laser cavity based on Nd³⁺ doped PLZT electrooptic ceramic[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [31] 王旭, 孙哲, 程光华. 高重复频率窄脉宽电光调Q Nd:YVO₄激光器[J]. *中国激光*. 2016, 43(6): 39–44.
WANG Xu, SUN Zhe, CHENG Guanghua, et al. High repetition rate and short pulse width electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 39–44.
- [32] FRIEL G J, CONROY R S, KEMP A J, et al. Q switching of a diode-pumped Nd:YVO₄ laser using a quadrupole electro-optic deflector[J]. *Applied Physics B*, 1998, 67(2): 267–270.
- [33] HORIUCHI R, SUNAGA H, SAIKI K, et al. High repetition frequency EO-Q-switched Nd-doped vanadate laser[C]// *IEEE Conference on Lasers & Electro-optics-pacific Rim*, 2007.
- [34] HORIUCHI R, ADACHI K, WATANABE G, et al. 1.4-MHz repetition rate electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. *Optics Express*, 2008, 16(21): 16729–16734.
- [35] LEBIUSH E, LAVI R, TZUK Y, et al. High power high repetition rate diode side-pumped Q-switched Nd:YAG rod laser[J]. *OPTICS COMMUNICATIONS*, 1998, 145(1-6): 119–122.
- [36] KIM J W, SAHU J K, CLARKSON W A. High-energy Q-switched operation of a fiber-laser-pumped Er:YAG laser[J]. *Applied Physics B*, 2011, 105(2): 263–267.
- [37] CHANG L, YANG C, PANG Q S, et al. 885 nm LD end-pumped 22.7 W high beam quality electro-optical Q-switched

- Nd:YAG laser[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(5): 914–917.
- [38] JIN L, LIU P, HUANG H, et al. Short pulse diode-pumped Tm:YAG slab laser electro-optically Q-switched by RbTiOPO₄ crystal[J]. *Optical Materials*, 2016, 60: 350–354.
- [39] ZHANG Z L, LIU Q, NIE M M, et al. 880-nm-diode-laser-end-pumped electrooptically Q-switched Nd:YLF laser with high energy and good beam quality at 1047 nm and 1 kHz[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1–8.
- [40] GAO Q, ZHANG H L, JAVED F. Laser diode partially end-pumped electro-optically Q-switched Yb:YAG slab laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(11).
- [41] WEN Y, LI T Y, HE Q F, et al. Laser-diode dual-end-pumped electro-optic Q-switched slab Tm:YAP laser[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 105: 103215.
- [42] ZAYHOWSKI J J, DILL C. Coupled-cavity electro-optically Q-switched Nd:YVO₄ microchip lasers[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(7).
- [43] ZHAO X, SONG Z, LI Y J, et al. High efficiency sub-nanosecond electro-optical Q-switched laser operating at kilohertz repetition frequency[J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(8):335-340.
- [44] 张赟坤, 陈檬, 庞庆生, 等. 楔角 Nd:YVO₄ 晶体电光调 Q 激光器性能研究[J]. *中国激光*, 2010(10): 26–29.
ZHANG Yunkun, CHEN Meng, PANG Qingsheng, et al. Study of electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser with a wedge angle[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010(10): 26–29.
- [45] 石朝辉, 刘学松, 黄玉涛, 等. 500 kHz, 6 ns 高重复频率电光腔倒空 Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 38–43.
SHI Zhaohui, LIU Xuesong, HUANG Yutao, et al. 500 kHz, 6 ns high repetition-rate electro-optical cavity dumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 38–43.
- [46] MCDONAGH L, WALLENSTEIN R, KNAPPE R. 47 W, 6 ns constant pulse duration, high-repetition-rate cavity-dumped Q-switched TEM₀₀ Nd:YVO₄ oscillator[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(22): 3303–3305.
- [47] ZHANG W Q, SHEN Y J, MENG Y, et al. 888 nm pumped dual Nd:YVO₄ crystals acousto-optic Q-switched laser[J]. *Optics Communications*, 2017, 401: 29–34.
- [48] 沈兆国, 董涛, 孟冬冬, 等. 百瓦级高重频腔倒空电光调 Q 激光器[J]. *光电子技术*, 2014, 34(4): 308–312.
SHEN Zhaoguo, DONG Tao, MENG Dongdong, et al. Study on hundred watts high repetition cavity-dumped electro-optically Q-switched laser[J]. *Optoelectronic Technology*, 2014, 34(4): 308–312.
- [49] 周丹丹, 尹兴良, 王煜, 等. 914 nm LD 抽运高效率腔倒空电光调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 79–83.
ZHOU Dandan, YIN Xingliang, WANG Yu, et al. High-efficiency electro-optical cavity-dumped Q-switched laser pumped by LD at 914 nm[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 79–83.
- [50] 耿爱丛, 赵慈, 李宝河, 等. 用于 355 nm 紫外光源的腔外倍频全固态激光器[J]. *光电子·激光*, 2011(2): 185–188.
GENG Aicong, ZHAO Ci, LI Baohe, et al. All-solid-state extracavity double-frequency laser for 355 nm UV source[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2011(2): 185–188.
- [51] 张恒利, 毛叶飞, 刘晓萌. 激光二极管部分端面泵浦混合腔板条激光器[J]. *光学技术*, 2020(3): 257–268.
ZHANG Hengli, MAO Yefei, LIU Xiaomeng, et al. Development of Innoslab lasers and amplifiers[J]. *Optical Technique*, 2020(3): 257–268.
- [52] MAO Y F, ZHANG H L, CUI J H, et al. 25 mJ, 5 kHz, 3 ns, Nd:YAG discrete path slab amplifier using a hybrid resonator[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2741–2744.
- [53] JAVED F, ZHANG H L, GAO Q, et al. A high average power, compact 100 kHz, 11.6-ns Nd:YAG Innoslab amplifier[J]. *Results in Physics*, 2020, 16: 102926.

[作者简介]

- 冉子涵 1996 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为高重频激光器。
赵一鸣 1983 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为激光雷达总体技术。
李 静 1985 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为激光器设计。
李之通 1991 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为固体激光器。
李祚涵 1989 年生, 博士, 工程师, 主要研究方向为激光器设计。