

doi:10.3788/gzxb20184705.0514002

# 电光-MoSe<sub>2</sub> 主被动双调 Q 946 nm 全固态激光器

李建林<sup>1</sup>, 雷广智<sup>2</sup>, 白杨<sup>1</sup>, 白冰<sup>1</sup>, 孙延笑<sup>1</sup>

(1 西北大学 光子学与光子技术研究所, 光电技术与功能材料省部共建国家重点实验室培育基地,  
陕西省全固态激光及应用工程技术研究中心, 西安 710069)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 空间光学应用研究室, 西安 710119)

**摘 要:**报道了一种基于电光-可饱和吸收主被动双调 Q 技术的窄脉冲宽度、高峰值功率 946 nm 全固态激光器. 该激光器采用 808 nm 脉冲半导体激光侧面泵浦长尺寸 Nd:YAG 晶体棒抽运方式和双凹型折叠谐振腔结构, 并将横向加压式的双 45°角切割掺氧化镁铌酸锂晶体电光调 Q 与单层二硒化钼被动可饱和吸收调 Q 相结合, 通过优化设计谐振腔结构, 在脉冲重复频率 550 Hz 时, 获得了最大单脉冲能量 3.15 mJ、脉冲宽度 9.1 ns、峰值功率高达 346 kW 的 946 nm 主被动双调 Q 脉冲激光的稳定输出, 脉冲宽度和能量的峰峰值不稳定性分别达到  $\pm 2.87\%$  和  $\pm 3.42\%$ , 光束质量因子分别为  $M_x^2 = 3.851$  和  $M_y^2 = 3.870$ .

**关键词:**主被动双调 Q; MoSe<sub>2</sub>; MgO:LiNbO<sub>3</sub> 电光晶体; 窄脉冲宽度; 高峰值功率

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)05-0514002-8

## Active-passive Double Q-switched 946 nm Laser with MgO:LiNbO<sub>3</sub> Electro-optic Crystal and MoSe<sub>2</sub> Saturable Absorber

LI Jian-lin<sup>1</sup>, LEI Guang-zhi<sup>2</sup>, BAI Yang<sup>1</sup>, BAI Bing<sup>1</sup>, SUN Yan-xiao<sup>1</sup>

(1 Institute of Photonics and Photo-Technology, National Key Laboratory of Photoelectric Technology and Functional Materials (Cultivation Base), Shaanxi Engineering Technology Research Center for All Solid State Laser and Application, Northwest University, Xi'an 710069, China)

(2 Space Optical Technology Research Department, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** An active-passive double Q-switched 946 nm laser was reported which with a double 45° cut-magnesium oxide doped LiNbO<sub>3</sub> electro-optic crystal and a monolayer molybdenum selenide saturable absorber. In order to obtain 946 nm laser pulses with high energy and high peak power, a pulsed laser diode side-pumped long Nd:YAG rod is used as the gain medium in a folded biconcave cavity. Output pulses with maximum pulse energy and peak power up to 3.15 mJ and 346 kW were obtained, corresponding to 550 Hz repetition rate and 9.1 ns pulse duration at 946 nm. Peak to peak instabilities of pulse width and pulse energy were  $\pm 2.87\%$  and  $\pm 3.42\%$ , beam quality factors were  $M_x^2 = 3.851$  and  $M_y^2 = 3.870$ .

**Key words:** Active-passive double Q-switching; MoSe<sub>2</sub>; MgO:LiNbO<sub>3</sub> crystal; Short pulse width; High peak power

**OCIS Codes:** 140.3540; 140.3580; 160.4236; 160.4330

## 0 引言

近年来, 稳定输出的高能量、窄脉冲宽度、高峰值功率的 946 nm 脉冲激光在差分吸收雷达、空间通信、

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61205114)和陕西省科技统筹创新工程计划项目(No. 2011KTCL01-06)资助

第一作者: 李建林(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全固态激光器技术. Email: bys627@163.com

导师(通讯作者): 白杨(1977-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为大功率全固态激光器及非线性频率变化. Email: by@nwu.edu.cn

收稿日期: 2017-12-18; 录用日期: 2018-01-30

<http://www.photon.ac.cn>

水蒸气探测、臭氧探测、二次谐波产生蓝光等领域均获得了广泛的应用<sup>[1-4]</sup>.946 nm 脉冲激光多采用尾纤传输的半导体激光 (Laser Diode, LD) 端面泵浦短尺寸的 Nd:YAG 晶体并结合声光、电光或被动调 Q 方式获得.例如:2009 年,ZHANG C 等<sup>[5]</sup>采用 LD 端面泵浦长度为 5 mm 的 Nd:YAG 陶瓷和声光调 Q 技术获得了脉冲重复率 10 kHz、脉冲宽度 58.3 ns、单脉冲能量 0.121 mJ 的 946 nm 激光输出;2015 年,黄晶等<sup>[6]</sup>采用 LD 端面泵浦长度为 11 mm 的端帽键合 Nd:YAG 晶体和 RTP 晶体电光调 Q 技术获得了脉冲重复率 1 kHz、脉冲宽度 17 ns、单脉冲能量 0.33 mJ 的 946 nm 激光输出;2017 年,LIN H F 等<sup>[7]</sup>采用 LD 端面泵浦长度为 5 mm 的 Nd:YAG 晶体和二硫化钼(Molybdenum Sulfide, MoS<sub>2</sub>)薄膜被动调 Q 技术获得了脉冲重复率 609 kHz、脉冲宽度 280 ns、单脉冲能量 0.35 μJ 的 946nm 激光输出.目前,采用主动电光、声光调 Q 与被动可饱和吸收(Saturable Absorption, SA)调 Q 相结合的双调 Q 模式已被广泛应用于进一步压缩脉冲的脉冲宽度,提高峰值功率和脉冲波形的对称性<sup>[8-10]</sup>.然而,采用主被动双调 Q 模式获得高能量、窄脉冲宽度、高峰值功率的 946 nm 脉冲激光的研究却很少见报道.2017 年,本课题组采用双布儒斯特角切割掺氧化镁铌酸锂晶体(Magnesium Oxide doped LiNbO<sub>3</sub>, MgO:LiNbO<sub>3</sub>)主动电光调 Q 与过渡金属硫化物单层二硒化钨(Tungsten Selenide, WSe<sub>2</sub>)被动可饱和吸收调 Q 相结合,实现了脉冲重复频率 500 Hz、脉冲宽度 10.8 ns、单脉冲能量 2.63 mJ 的主被动双调 Q 运转 946nm 脉冲激光输出,对应峰值功率达到 244 kW<sup>[11]</sup>.研究表明,采用过渡金属硫化物与电光调 Q 相结合的主被动双调 Q 来压缩 946nm 激光脉冲宽度并提高其峰值功率是可行的.近年来,与 WSe<sub>2</sub>具有相似分子结构的二硒化钼(Molybdenum Selenide, MoSe<sub>2</sub>)同样具有较小带隙且带隙可调的光电特性(减少层数或引入缺陷).特别是从 400 nm 到 2 100 nm 的宽带非线性光学可饱和吸收特性<sup>[12-13]</sup>,使其被广泛应用于波长大于 1 μm 的被动调 Q 或被动锁模激光实验研究<sup>[14-16]</sup>,但是将其应用于波长小于 1 μm 的 946 nm 激光实验研究却未见报道.此外,与双布儒斯特角切割的 MgO:LiNbO<sub>3</sub>电光晶体相比,具有更小插入损耗和更高消光比的双 45°角切割的 MgO:LiNbO<sub>3</sub>电光晶体更有利于进一步压缩脉冲宽度,提高单脉冲能量.

本文采用 808 nm 脉冲 LD 侧面泵浦长尺寸的 Nd:YAG 晶体棒和双 45°角切割的 MgO:LiNbO<sub>3</sub>晶体加压机电光调 Q 技术,通过优化设计折叠谐振腔结构并引入单层 MoSe<sub>2</sub>可饱和吸收体,实现了幅值稳定、窄脉冲宽度、高峰值功率的 946 nm 主被动双调 Q 脉冲激光输出.研究表明,双 45°角切割 MgO:LiNbO<sub>3</sub>+单层 MoSe<sub>2</sub>主被动双调 Q 技术不但能够进一步压缩 946 nm 脉冲激光的脉冲宽度和谱线宽度、提高峰值功率,而且对改善脉冲波形的对称性和光束质量具有帮助.

## 1 MoSe<sub>2</sub>薄膜可饱和吸收体的制备和表征

实验采用化学气相沉积法 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 制备 MoSe<sub>2</sub> 薄膜.如图 1 所示,将装有 MoO<sub>3</sub> 粉体 (250 mg, 99.6%) 的器皿和 SiO<sub>2</sub> 衬底 (厚 25 μm, 尺寸 2×2 cm<sup>2</sup>) 放置在高温管式炉内的石英管中心,将装有 Se 粉体 (500 mg, 99.6%) 的器皿放置在石英管的气体入口处,并通入流速为 200 sccm 的 Ar 气用于排出管内空气.一个小时后,高温管式炉内温度以 30°C/min 升至 950°C,控制 Ar 气流量并注入 H<sub>2</sub> 气.混合气体的流速为 50 sccm, Ar 气和 H<sub>2</sub> 气的比例分别为 94% 和 6%.H<sub>2</sub> 气作为催化剂和还原剂用来加速 MoO<sub>3</sub> + 3Se + H<sub>2</sub> → MoSe<sub>2</sub> + SeO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O 的化学反应<sup>[17-18]</sup>.在 950°C 高温下,MoSe<sub>2</sub> 分子得以沉积在 SiO<sub>2</sub> 衬底上并生长出 MoSe<sub>2</sub> 薄膜.反应持续 5 min 后,关闭 H<sub>2</sub> 气并开始降温,Ar 气流速降至 20-30 sccm,直至室温.

图 2(a) 为 532 nm 激光激励的 MoSe<sub>2</sub> 薄膜样品所获取的拉曼光谱图,可以看到 A<sub>1g</sub> (240.5 cm<sup>-1</sup>) 和 E<sub>2g</sub><sup>1</sup> (287.7 cm<sup>-1</sup>) 两个特征峰,表明实验制备的薄膜材料为 MoSe<sub>2</sub><sup>[17, 19]</sup>.图 2 (b) 为原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 拍摄获取的 MoSe<sub>2</sub> 薄膜样品微观形态.经剖面分析测试,薄膜厚度大约为 0.77 nm,表明其结构为单层<sup>[19]</sup>.图 2(c) 为宽谱角分辨光谱仪探测获取的可见光至近红外波段 MoSe<sub>2</sub> 薄膜样品的线

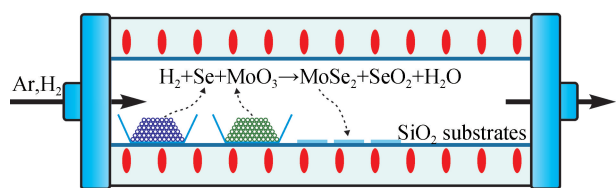


图 1 CVD 法制备 MoSe<sub>2</sub> 薄膜的生长过程示意图  
Fig.1 Schematic of the CVD tube furnace for MoSe<sub>2</sub> film growth on SiO<sub>2</sub> substrates

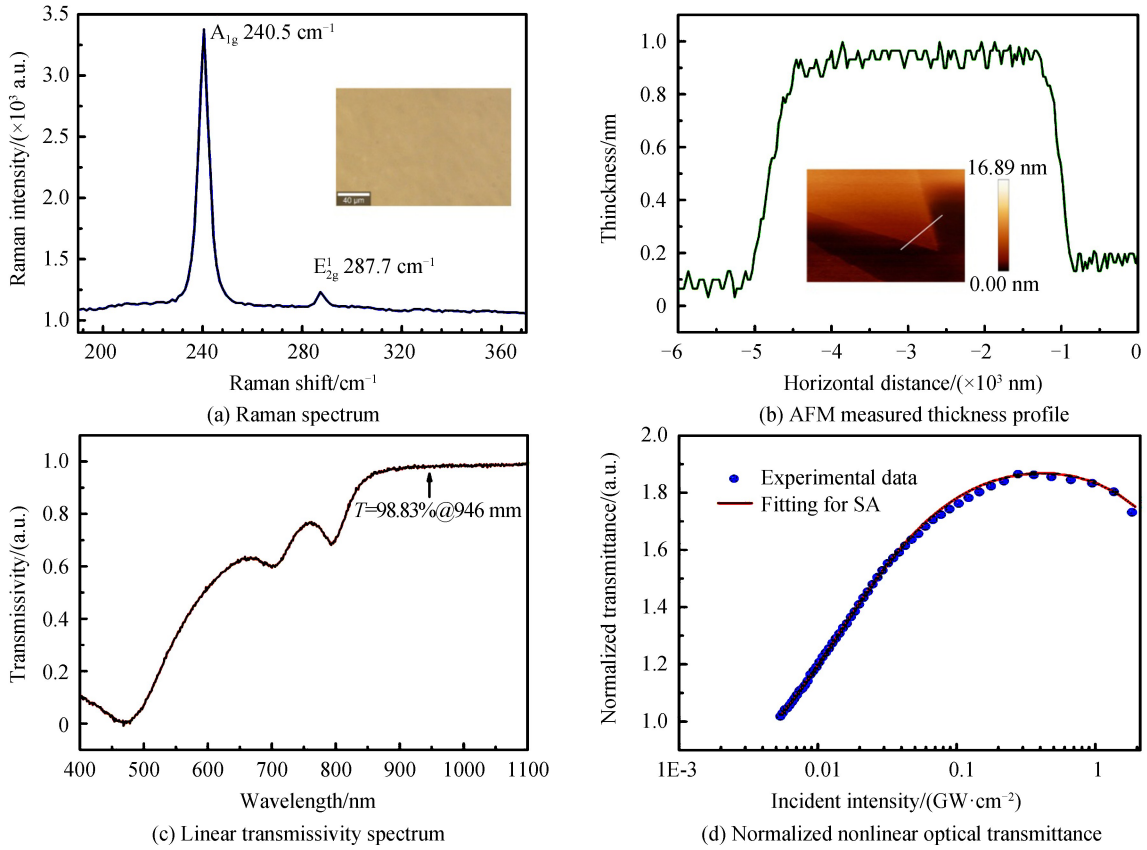


图 2 MoSe<sub>2</sub> 薄膜样品的光学特征曲线  
Fig.2 Optical characteristic curves of MoSe<sub>2</sub> film sample

性吸收光谱.结果表明,厚度为 0.77 nm 的单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜对 946 nm 波长的透过率为 98.83%.利用朗伯定律  $I = I_0 e^{-\alpha L}$  可以计算出实验制备的单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜在 946 nm 波长处的线性吸收系数  $\alpha = 0.153 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$ , 其中  $I$  为透射光强,  $I_0$  入射光强,  $L$  为薄膜厚度.此外,利用 1 030 nm 飞秒激光 (340 fs, 100 Hz) 实验开展了对单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜样品的开孔 Z 扫描探测,其归一化非线性光学透过率变化曲线如图 2 (d) 所示.根据测量数据和归一化非线性光学透过率理论拟合公式<sup>[11, 21]</sup>为

$$T = \left( 1 - \frac{\alpha_0 L}{1 + I/I_s} - \beta I L - \alpha_{ns} \right) / (1 - \alpha_0 L) \quad (1)$$

式中  $\alpha_0 L$  为调制深度,  $I_s$  为饱和功率强度,  $L$  单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜厚度,  $\alpha_{ns}$  为非可饱和吸收系数,可以理论计算出实验制备的单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜的非可饱和吸收系数  $\alpha_{ns} = 5.44\%$ , 调制深度  $\alpha_0 L = 0.98\%$ .需要注意的是,理论上只有能量大于带隙的光子才有可能被光学材料吸收利用,而上述 1 030 nm 飞秒激光 Z 扫描探测却验证了理论带隙约为 1.6 eV 的单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜对光子能量仅为 1.2 eV 的 1 030 nm 激光具有可饱和吸收性,显然单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜的晶格缺陷引发带隙减小且小于光子能量可以为该现象提供一个合理的解释<sup>[21]</sup>,故而验证了实验制备的单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜作为一种二维可饱和吸收材料可以用于波长小于 1 030 nm (例如: 946 nm) 的激光被动调 Q 或被动锁模研究.

当然若将实验制备的单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜样品作为可饱和吸收镜来使用,还需要通过以下转移过程:首先将聚甲基丙烯酸甲酯 (Polymethyl Methacrylate, PMMA) 有机溶剂作为支撑涂层旋涂在单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜上,并将样品置于 100°C 的真空干燥箱内烘干 10 min.之后将样品快速浸泡到温度同为 100 °C、浓度为 2 mol/L 的 NaOH 溶液中,直到 SiO<sub>2</sub> 衬底被完全腐蚀干净.随后将贴附着 PMMA 的 MoSe<sub>2</sub> 薄膜直接转移至 946 nm 高反镜表面,并使用丙酮和异丙醇溶剂完全溶解掉 PMMA.最后在经过弱气流的氮气吹拂、乙醇漂洗和 2 h 45°C 真空干燥流程后,单层 MoSe<sub>2</sub> 可饱和吸收镜则被制备出来.

## 2 激光实验装置及原理

基于主被动双调 Q 技术和脉冲 LD 侧面泵浦 Nd : YAG 晶体的 946 nm 脉冲激光器装置原理图如图 3

所示.808 nm 脉冲 LD 的脉冲重复频率为 1kHz~1Hz 可调,泵浦占空比 25%,脉冲宽度为 250 $\mu$ s.增益介质 Nd:YAG 晶体棒的尺寸为  $\phi$ 3 mm $\times$ 65 mm, Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 0.5 at.%, 两个通光端面均镀制 946 nm、1 064 nm 和 1 319 nm 的三色增透膜(反射率  $R < 0.2\%$ @946 nm,  $R < 0.5\%$ @1 064~1 319 nm).脉冲 LD 侧面泵浦长尺寸 Nd:YAG 晶体棒的方法有助于获得较高的受激辐射增益而提高 946 nm 激光的脉冲能量<sup>[22-23]</sup>,脉冲 LD 较小的占空比则能够缓解在长尺寸的晶体棒内因 946 nm 严重的荧光光子再吸收和固有寄生振荡而导致的热效应<sup>[24]</sup>.M<sub>1</sub> 为平凹全反射镜,M<sub>2</sub> 为平凹输出镜.M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 两镜的平面均其镀制 1 064 nm 和 1 319 nm 双色增透膜( $R < 0.5\%$ @1 064~1 319 nm),M<sub>1</sub> 镜的凹面镀制 946 nm 高反膜( $R > 99.8\%$ @946 nm)和 1 064 nm、1 319 nm 双色增透膜( $R < 1\%$ @1 064~1 319 nm);M<sub>2</sub> 镜的凹面镀制三色增透膜(透射率  $T \approx 9\%$ @946 nm,  $R < 1\%$ @1 064~1 319 nm).实验采用两个对角均被切割为 45°角的 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体作为电光调 Q 晶体.该晶体不但具有横向半波电压低、不易潮解、承受光强比普通 LiNbO<sub>3</sub> 晶体提高两个数量级<sup>[25]</sup>、价格低廉等优点,而且在光调制中起到了起偏器、电光调制器和检偏器的三重作用.无需像纵向加压电光调制需要在激光谐振腔内插入起偏器和 1/4 波片而增加插入损耗,更重要的是基于双 45°横向电光调制双折射效应可以提高该晶体的消光比,缩短该晶体对振荡光的关断时间和激光脉冲的拖尾时间,从而有利于压缩脉冲宽度,提高单脉冲能量.晶体厚度为 5 mm,45°切割角对应的两斜边长度分别为 23 mm (a 边)和 9.89 mm (b 边),MgO 掺杂浓度为 5.5 mol%,光抗损伤阈值 250 MW/cm<sup>2</sup>;两个相互平行的通光面(5 mm $\times$ 23 mm 的矩形面)分别镀制 946 nm 增透膜( $R < 0.2\%$ ),两个反射面(5 mm $\times$ 9.89 mm 的矩形面)分别镀制 946 nm 高反膜( $R > 99.8\%$ ).当双 45°切割 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体未加载半波电压时,入射的 946 nm 非偏振光因自然双折射效应将在晶体内分解为一束寻常偏振光(o 光)和一束非常偏振光(e 光).出射的 o 光和 e 光均与入射的非偏振光束平行.由于在出射光路的方向上并未垂直放置 M<sub>2</sub> 输出镜,因此无法形成 946 nm 激光振荡;当横向半波电压瞬间加载至双 45°切割 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体时,由于横向电光效应,o 光和 e 光经过 90°偏振态旋转变换后,产生的 e' 光和 o' 光均不与入射的非偏振光束平行.若在 o' 光的出射光路上垂直放置 M<sub>2</sub> 输出镜,将在 M<sub>1</sub> 镜与 M<sub>2</sub> 镜之间实现 o' 偏振 946 nm 激光的振荡放大.若将单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜转移至 M<sub>1</sub> 镜的凹面,则 M<sub>1</sub> 镜可作为单层 MoSe<sub>2</sub> 可饱和吸收镜用于实现 946 nm 激光主被动双调 Q 运转.

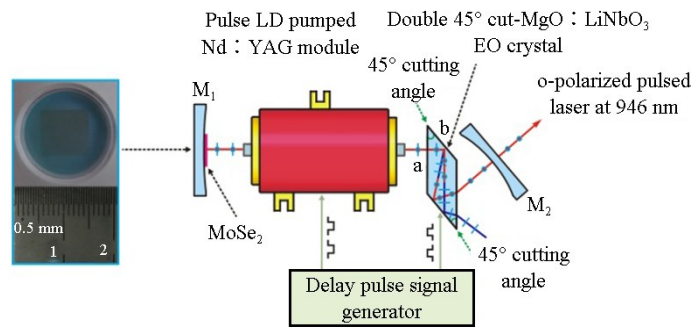


图3 脉冲 LD 侧面泵浦电光腔倒空激光器结构示意图  
Fig.3 Schematic of pulsed LD side pumped electro-optic cavity-dumping laser

由于随着脉冲 LD 泵浦电功率的增加,增益介质的热效应加剧,热透镜焦距减小,这会严重影响谐振腔的输出稳定性,甚至造成腔失谐而无法产生激光振荡.因此,需要对谐振腔的结构进行优化设计,使其在一定的热焦距变化范围内具有动态热不灵敏性<sup>[23]</sup>.在最大脉冲重复频率 550 Hz 时(超过 550 Hz,热积累增加,946 nm 输出功率大幅下降),LD 泵浦单脉冲能量从 90 mJ 升至 160 mJ 时,利用热透镜焦距动态 CCD 测试法<sup>[26]</sup>测量得到热透镜焦距从 150 mm 下降至 80 mm 左右.在 Nd:YAG 晶体棒和双 45°切割 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体尺寸已经确定的前提下,根据热焦距的变化,实验利用激光谐振腔设计软件(Laser Cavity Analysis and Design, LASCAD)对谐振腔的结构参数进行了优化设计,最终确定 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub> 镜的凹面曲率半径分别为 3.0 m 和 1.0 m,谐振腔长为 132 mm.同时依据 ABCD 矩阵理论,当脉冲重复频率为 550 kHz 时,理论计算得到 946 nm 谐振腔的稳定性参数的变化规律为

$$\left| \frac{A_s + D_s}{2} \right| \approx 0.3221 \rightarrow 0.6574 \quad (2)$$



$$\left| \frac{A_t + D_t}{2} \right| \approx 0.2945 \rightarrow 0.6217 \quad (3)$$

式中 s、t 分别表示弧矢面光斑和子午面光斑。式(2)、(3)数据表明,在热焦距的整个变化范围内,谐振腔的稳定性参数始终小于 1,经过优化设计的谐振腔对热焦距的变化具有热不灵敏性。在最大泵浦电流 120 A 时,理论模拟的 946 nm 多模激光束弧矢面光斑尺寸、子午面光斑尺寸随腔长的变化规律如图 4 所示。M<sub>1</sub> 镜凹面处、Nd:YAG 晶体棒和双 45°切割 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 电光晶体中多模激光束的弧矢面光斑、子午面光斑尺寸分别约为 2.4 mm, 2.6 mm 和 2.1 mm;同一位置处,弧矢面光斑尺寸与子午面光斑尺寸彼此之间的差异很小。模拟结果表明,腔型的优化设计将有助于提高激光输出质量,扩大 M<sub>1</sub> 镜凹面处的光斑尺寸,降低光斑能量密度,从而有效避免单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜的光损伤风险。

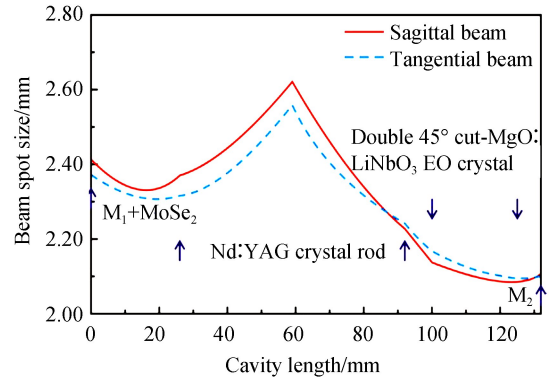


图 4 946 nm 激光谐振腔内光斑直径沿谐振腔变化的仿真结果  
Fig.4 Beam diameters as function of the 946 nm laser cavity length

### 3 实验结果

实验中,双 45°切割 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 晶体加载的横向半波电压@946 nm 为 4.2±0.2 kV。采用 (最大峰值-最小峰值)×0.5/平均值的公式计算 5 000 个脉冲的能量及脉冲宽度的峰峰值不稳定性,采用 (单脉冲能量/脉冲宽度)的公式计算脉冲峰值功率<sup>[23]</sup>。而脉冲波形的对称系数则由公式  $\gamma = \tau_R / \tau_F$  计算得到,其中  $\tau_R$ 、 $\tau_F$  分别代表脉冲波形的上升沿和下降沿<sup>[26]</sup>。550 Hz 脉冲重复频率时,EO 主动、MoSe<sub>2</sub> 被动以及 EO+MoSe<sub>2</sub> 主被动三种不同调 Q 模式下 946nm 激光的脉冲宽度及单脉冲能量随泵浦电流、电压变化规律如图 5(a) 所示。在最大有效 LD 泵浦能量为 152 mJ 时,三种调 Q 模式的 946nm 激光脉冲输出参量如表 1 所示,谱线宽度变

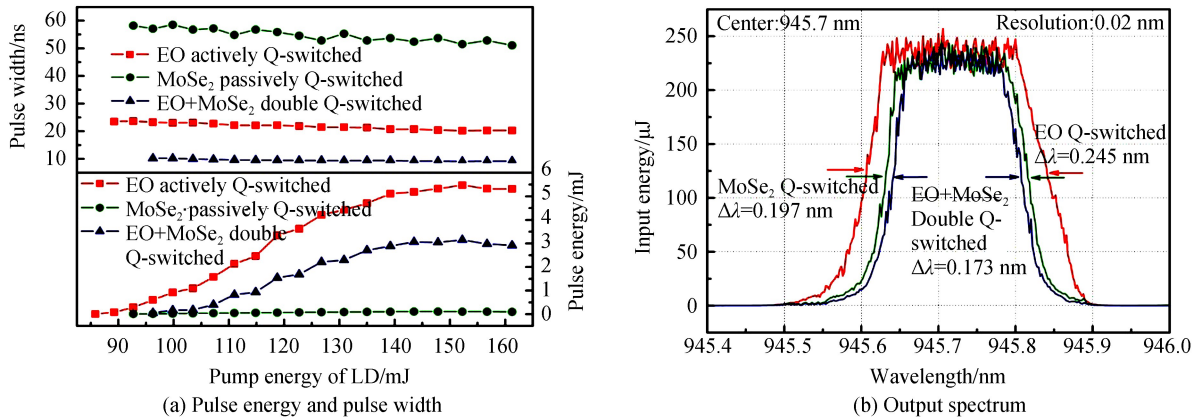


图 5 主动、被动和主被动三种调 Q 模式运转输出的 946 nm 脉冲激光特征参量的变化规律  
Fig.5 Output performances of 946 nm pulse laser for with actively EO, MoSe<sub>2</sub> passively and actively-passively Q-switching operation

表 1 最大泵浦功率条件下主动、被动和主被动三种调 Q 模式运转输出的 946nm 脉冲激光特性参量  
Table 1 Laser performances of 946 nm pulse laser for with actively EO, MoSe<sub>2</sub> passively and actively-passively Q-switching operation

Q-switching mode	Maximum single pulse energy	Pulse duration	Peak power	Peak-to-peak instability of duration	Peak-to-peak instability of energy	Spectral linewidth	Symmetrical factor
EO-actively	5.48 mJ	20.2 ns	271 kW	±4.66%	±5.78%	0.245 nm	0.38
MoSe <sub>2</sub> -passively	0.106 mJ	51.5 ns	2.06 kW	±6.18%	±8.14%	0.197 nm	0.92
Actively-passively	3.15 mJ	9.1 ns	346 kW	±2.87%	±3.42%	0.173 nm	0.87

化如图 5 (b) 所示, 而脉冲波形如图 6(a)、(b)、(c) 所示.

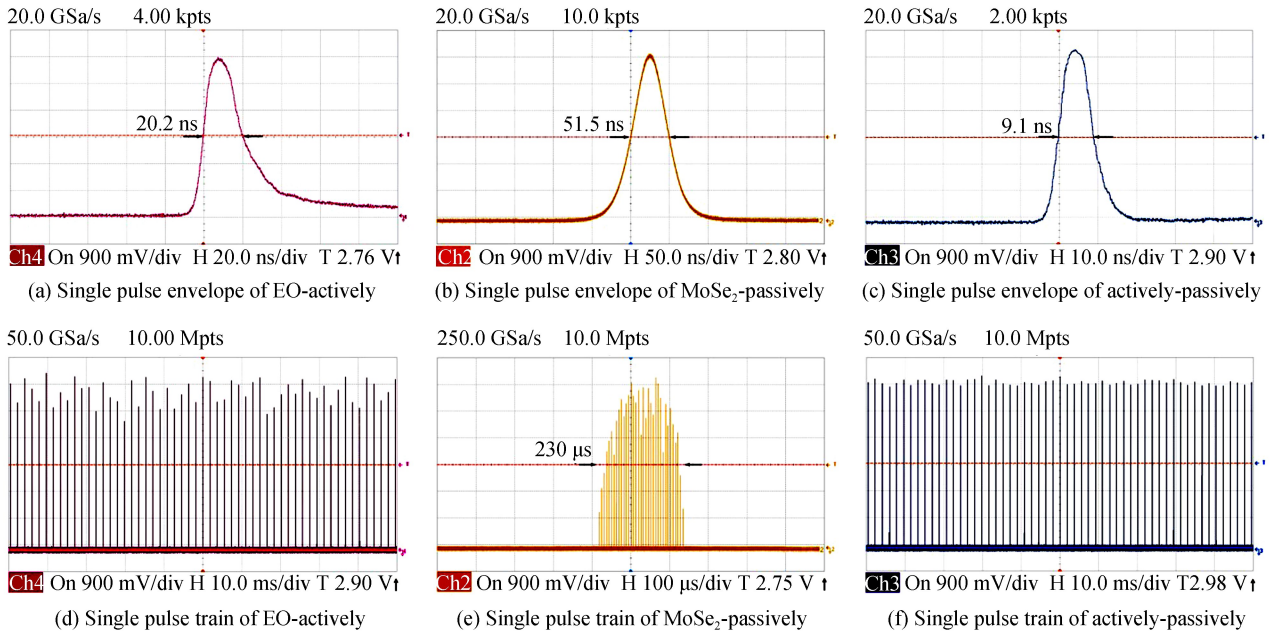


图 6 主动、被动和主被动三种调 Q 模式输出的 946 nm 脉冲激光的脉冲波形和脉冲序列

Fig.6 Single pulse envelopes and pulse train of 946 nm pulse laser for with actively EO, MoSe<sub>2</sub> passively and actively-passively Q-switching operation

当单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜未转移至 M<sub>1</sub> 镜时, 由同步脉冲信号发生器向脉冲 LD 泵浦模块的驱动电源和双 45° 切割 MgO : LiNbO<sub>3</sub> 晶体的高压驱动电源提供双路延时触发信号, 808 nm 脉冲 LD 泵浦光的触发能够与双 45° 切割 MgO : LiNbO<sub>3</sub> 晶体加压精确同步, 从而实现主动电光调 Q 946 nm 激光输出. 主动电光调 Q 运转的最大单脉冲达到 5.48 mJ、脉冲宽度为 20.2 ns, 对应峰值功率为 271 kW, 谱线宽度为 0.245 nm, 光光转换效率约为 3.61%. 当单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜转移至 M<sub>1</sub> 镜且双 45° 切割 MgO : LiNbO<sub>3</sub> 晶体始终处于加压状态 (电光开关始终处于打开状态, 无触发信号) 时, 可以实现 MoSe<sub>2</sub> 被动调 Q 激光输出. 在最大的有效泵浦功率下, 实验获得了重复频率为 550 Hz、脉冲宽度约为 250 μs 的 946 nm 激光脉冲串. 每个脉冲串包含大约 35 个子脉冲, 子脉冲的重复频率、谱线宽度、单脉冲能量、脉冲宽度和峰值功率分别约为 152 kHz、0.197 nm、0.106 mJ、51.5 ns 和 2.06 kW, 光光转换效率约为 2.44%. 当单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜转移至 M<sub>1</sub> 镜, 继续由同步脉冲信号发生器向脉冲 LD 泵浦模块的驱动电源和双 45° 切割 MgO : LiNbO<sub>3</sub> 晶体的高压驱动电源提供双路延时触发信号, 则可以实现主被动双调 Q 的 946 nm 脉冲激光输出, 最大单脉冲能量 3.15 mJ、脉冲宽度 9.1 ns, 对应峰值功率高达 346 kW, 谱线宽度为 0.173 nm, 光光转换效率约为 2.07%.

实验结果表明, 置入谐振腔内的单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜因其价带吸收所引发的腔内损耗会提高谐振腔的激光振荡阈值, 远离中心波长的纵模由于获得的增益小于振荡阈值而被抑制, 只有靠近中心波长的少数纵模能够获得较大增益而形成激光振荡, 故单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜作为可饱和吸收体而具有选纵模和滤波的作用. 与主动电光调 Q 和 MoSe<sub>2</sub> 被动调 Q 模式相比, 主被动双调 Q 运转输出的单脉冲能量虽然有所下降, 但是脉冲宽度从 51.5 ns 压缩至 9.1 ns, 峰值功率从 2.06 kW 大幅提升至 346 kW; 谱线宽度从 0.245 nm 压缩至 0.173 nm, 脉冲波形的对称因子也从 0.38 提高到了 0.87. 同时纵模数的减小能够减小模式竞争, 从而进一步提高了激光输出的稳定性, 而脉冲宽度和单脉冲能量的峰-峰值不稳定性则均出现了小幅下降. 三种调 Q 模式下获得的脉冲序列如图 6(d)、(e)、(f) 所示.

此外, 在最大的有效 LD 泵浦能量为 152 mJ 时, 实验采用光束质量分析仪分别对 EO 主动、MoSe<sub>2</sub> 被动和主被动三种调 Q 运转输出的 946 nm 激光束进行了光束质量分析, 测试数据如表 2 所示. 图 7(a)、(b)、(c) 分别为三种调 Q 模式的近场光束 3D 和 2D 光斑能量密度分布测试图. 显然, 单层 MoSe<sub>2</sub> 可饱和吸收体的使用有助于提高 946 nm 激光光束质量, 从 EO 主动调 Q 到 MoSe<sub>2</sub> 被动调 Q 再到主被动双调 Q 模式, M<sup>2</sup> 因子、远场发散角  $\theta$  和光束直径  $d$  均呈现减小趋势即可以得到佐证.

表 2 主动、被动和主被动三种调 Q 模式运转输出的 946 nm 脉冲激光的光束质量参数  
Table 2 Beam quality parameters of 946 nm pulse laser for with actively EO, MoSe<sub>2</sub> passively and actively-passively Q-switching operation

Properties		Q-switching operation modes		
		EO-actively	MoSe <sub>2</sub> -passively	Actively-passively
$M^2$ factor	$M_x^2$	5.988	4.223	3.851
	$M_y^2$	6.492	4.510	3.870
Divergence angle	$\theta_x$	4.63 mrad	3.75 mrad	3.45 mrad
	$\theta_y$	4.71 mrad	3.58 mrad	3.54 mrad
Waist size	$d_x$	1.753 mm	1.526 mm	1.516 mm
	$d_y$	1.866 mm	1.707 mm	1.460 mm

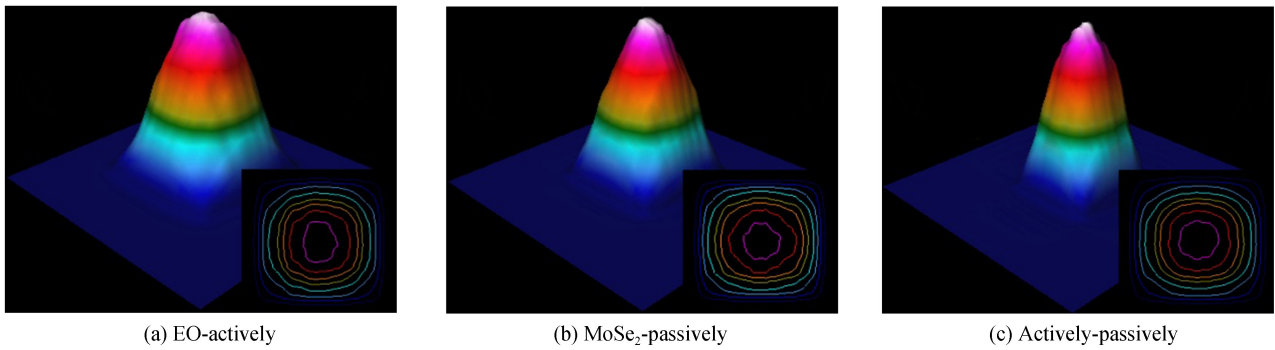


图 7 主动、被动和主被动三种调 Q 模式运转输出的 946 nm 脉冲激光近场 3D 和 2D 光斑能量密度分布  
Fig.7 3D and 2D beam energy density distributions of 946 nm pulse laser for with actively EO, MoSe<sub>2</sub> passively and actively-passively Q-switching operation

## 4 结论

实验研究了一种基于双 45°角切割 MgO : LiNbO<sub>3</sub> 电光晶体和单层 MoSe<sub>2</sub> 薄膜可饱和吸收体的主被动双调 Q 946 nm 全固态脉冲激光器.通过结构优化设计,采用脉冲 LD 侧面泵浦长尺寸 Nd : YAG 晶体棒的谐振腔具有良好的热不灵敏特性.在脉冲重复频率 550 Hz 时,实现了最大单脉冲能量 3.15 mJ、脉冲宽度 9.1 ns、峰值功率高达 346 kW 的 946 nm 脉冲激光的稳定输出.脉冲宽度及能量的峰峰值不稳定性分别为 ±2.87% 和 ±3.42%,脉冲波形对称性因子达到 0.87,光束质量因子为  $M_x^2 = 3.851, M_y^2 = 3.870$ .实验结果表明,采用电光调制结合 MoSe<sub>2</sub> 薄膜被动调制的主被动双调 Q 运转模式是一种能够有效压缩激光脉冲宽度和谱线宽度,提高峰值功率、脉冲波形对称性以及光束质量的重要途径.

### 参考文献

- [1] DU Ge-guo, ZHU He-yuan, ZHU Jiu-gao, *et al.* LD-pumpe Nd : YAG CW 946nm laser source for periodically poled LiNbO<sub>3</sub>[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(8): 973-976.  
杜戈果,朱鹤元,朱九皋,等.用于准相位匹配的 LD 泵浦 Nd : YAG 946 nm 连续激光光源[J]. *光子学报*, 2001, **30**(8): 973-976.
- [2] LI Xiao-qing, WANG Zhen-ju, FENG Jin-xiao, *et al.* All-solid-state Nd : YAG dual-wavelength laser at 473 nm and 946 nm [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2012, **19**(2): 177-181.  
李晓青,万振菊,冯晋霞,等.473nm 和 946nm 双波长输出的全固态 Nd : YAG 激光器[J]. *量子光学学报*, 2012, **19**(2): 177-181.
- [3] NG S P, MACKENZIE J I. Power and radiance scaling of a 946 nm Nd : YAG planar waveguide laser[J]. *Laser Physics*, 2012, **22**(3): 494-498.
- [4] XU C W, WEI Z Y, ZHANG Y D, *et al.* Diode-pumped passively mode-locked Nd : GSAG laser at 942nm [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(15): 2324-2326.
- [5] ZHANG C, ZHANG X Y, WANG Q P, *et al.* Diode-pumped Q-switched 946 nm Nd : YAG ceramic laser [J]. 2009, *Laser Physics Letters*, 2009, **6**(7): 521-525.
- [6] HANG Jing, HU Xiu-han, CHEN Wei-biao. LD-pumped electro-optically Q-switched 946 nm Nd : YAG laser with pulse repetition rates of 1 kHz [J]. *Chines Journal of Lasers*, 2015, **42**(6): 0602008.  
黄晶,胡秀寒,陈卫标. LD 抽运 1 kHz 电光调 Q 946 nm Nd : YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2015, **42**(6): 0602008.

- [7] LIN H F, ZHU W Z, XIONG F B, *et al.* MoS<sub>2</sub>-based passively Q-switched diode-pumped Nd : YAG laser at 946 nm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 91: 36-39.
- [8] SUN Kai-ying, ZHAO Sheng-zhi, LI Gui-qiu, *et al.* Q-switched laser combined with electric-optic modulator and GaAs saturable absorber [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 204-206.  
孙楷英, 赵圣之, 李桂秋, 等. 电光-GaAs 主被动双调 Q 激光特性研究[J]. 激光技术, 2008, 32(2): 204-206.
- [9] ZHANG Hai-peng, XI Dao-ming, WANG Jing, *et al.* Control of the pulse duration in a diode-pumped doubly Q-switched Nd : GdVO<sub>4</sub> Laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 797-801.  
张海鹏, 席道明, 王静, 等. 双调 Q Nd : GdVO<sub>4</sub> 激光器的脉宽控制 [J]. 光学学报, 2010, 30(3): 797-801.
- [10] QIAO J P, ZHAO S J, YANG K J, *et al.* Doubly Q-switched laser with AOM-and SWCNT-SA-driven KTP intracavity OPO [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(21): 2455-2458.
- [11] SUN Y X, BAI Y, LI D, *et al.* 946 nm Nd : YAG double Q-switched laser based on monolayer WSe<sub>2</sub> saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21037-21048.
- [12] WANG K P, WANG J, FAN J T, *et al.* Ultrafast saturable absorption of two-dimensional MoS<sub>2</sub> nanosheets [J]. *ACS Nano*, 2013, 7 (10): 9260-9267.
- [13] LUO Z Q, LI Y Y, ZHONG M, *et al.* Nonlinear optical absorption of few-layer molybdenum diselenide (MoSe<sub>2</sub>) for passively mode-locked soliton fiber laser [J]. *Photonics Research*, 2015, 3 (3): A79-A86.
- [14] WOODWARD R I, HOWE R C, RUNCORN T H, *et al.* Wideband saturable absorption in few-layer molybdenum diselenide (MoSe<sub>2</sub>) for Q-switching Yb-, Er- and Tm-doped fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 20051-20061.
- [15] AHMAD H, ISMAIL M A, SATHIYAN S, *et al.* S-band Q-switched fiber laser using MoSe<sub>2</sub> saturable absorber [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 93-98.
- [16] AHMAD H, SUTHASKUMAR M, TIU Z C, *et al.* Q-switched Erbium-doped fiber laser using MoSe<sub>2</sub> as saturable absorber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 79: 20-23.
- [17] CHANG Y H, ZHANG W J, ZHU Y H, *et al.* Monolayer MoSe<sub>2</sub> grown by chemical vapor deposition for fast photodetection [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(8): 8582-8590.
- [18] SHAW J C, ZHOU H L, CHEN Y, *et al.* Chemical vapor deposition growth of monolayer MoSe<sub>2</sub> nanosheets [J]. *Nano Research*, 2014, 7(4): 511-517.
- [19] CHEN S Y, ZHENG C X, FUHRER M S, *et al.* Helicity-resolved raman scattering of MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, and WSe<sub>2</sub> atomic layers [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(4): 2526-2532.
- [20] ZHANG Y J, GONG Q F, LI L, *et al.* MoSe<sub>2</sub> porous microspheres comprising monolayer flakes with high electrocatalytic activity [J]. *Nano Research*, 2015, 8(4): 1108-1115.
- [21] ZHANG S F, DONG N N, MCEVOY N, *et al.* Direct observation of degenerate two-photon absorption and its saturation in WS<sub>2</sub> and MoS<sub>2</sub> monolayer and few-layer films [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(7): 7142-7150.
- [22] HAN Yao-feng, ZHANG Ruo-fan, YANG Hong-ru, *et al.* Time-variable thermal effect in side-pump high power pulsed Nd : YAG laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(6): 061005.  
韩耀锋, 张若凡, 杨鸿儒, 等. 脉冲 LDA 侧面泵浦大能量 Nd : YAG 激光器时变热效应分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(6): 061005.
- [23] LU Yi-xin, BAI Yang, BAI Bing, *et al.* MgO:LN electro-optic crystal cavity-dumped Nd : YAG laser for short pulse width and high peak power at 1 kHz [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(8): 0814001.  
卢一鑫, 白杨, 白冰, 等. 1 kHz 窄脉宽高峰值功率 MgO : LN 电光腔倒空 Nd : YAG 激光器[J]. 光子学报, 2017, 46(8): 0814001.
- [24] KIMMELMA O, KAIIVOLA M, TITTONEN I, *et al.* Short pulse, high peak power, diode pumped, passively Q-switched 946 nm Nd : YAG laser[J]. *Optics Communications*, 2007, 273 (2): 496-499.
- [25] SU Zhuo-lin, MENG Qing-long, YU Jun-li, *et al.* Analysis of damage threshold of MgO-doped LiNbO<sub>3</sub> crystals[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1116003.  
苏卓琳, 孟庆龙, 于军立, 等. 掺氧化镁铌酸锂晶体的损伤阈值分析[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1116003.
- [26] 白杨. LD 侧面泵浦多晶 Nd : YAG 陶瓷 BBO 电光调 Q 窄脉宽绿光、紫外光激光器研究[D]. 西安: 西北大学, 2010.