

# 基于铌酸锂晶体预偏置的电光调 Q 技术研究\*

顾海栋, 张翔, 王秋实

(中国航空制造技术研究院, 北京 100024)

**[摘要]** 为了优化调 Q 激光器谐振腔结构, 基于铌酸锂晶体双折射特性, 设计了铌酸锂晶体预偏置的电光调 Q 激光谐振腔, 并理论分析和仿真了晶体预偏置角度的要求, 获得了晶体预偏置角度与铌酸锂晶体长度之间的对应关系。最后以试验验证了该技术的可行性, 获得了 15.76ns 脉宽、108mJ 能量的调 Q 激光脉冲。

**关键词:** 铌酸锂; 电光调 Q; 脉冲激光器; 双折射; 预偏置技术

## Electro-Optic Q-Switching Technology Based on Pre-Deflection of LiNbO<sub>3</sub> Crystal

GU Haidong, ZHANG Xiang, WANG Qiushi

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China)

**[ABSTRACT]** Based on the birefringence of the LiNbO<sub>3</sub> (LN) crystal, it firstly designed a electro-optic Q-switching technique with a pre-deflection of LN crystal. This technique can optimize the structure of Q-switched laser oscillators. Then it analyzed the angle of the pre-deflection the LiNbO<sub>3</sub> (LN) in theoretical and simulated the relationship between the angle and the length of the crystal. Finally, an experiment was done to confirm the design, and it successfully obtained the pulsed laser, whose pulse width was 15.76ns with a 108mJ energy.

**Keywords:** LiNbO<sub>3</sub>; Electro-optic Q-switch; Pulsed laser; Birefringence; Pre-bias technology

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.17.093

在激光脉冲测距、激光加工等诸多应用场合, 激光器往往要求输出窄脉宽、高功率的脉冲<sup>[1-2]</sup>。激光调 Q 是压缩激光脉冲脉宽、提高峰值功率的重要技术, 该技术有多种各有优劣的实现途径。其中, 基于铌酸锂电光开关的调 Q 激光谐振腔, 以其环境适应性强、脉冲频率稳定可控等性能优势而得以广泛推广<sup>[3-6]</sup>。

电光调 Q 激光谐振腔中的铌酸锂电光开关主要分为 3 类<sup>[7]</sup>, 分别为: 半波( $\lambda/2$ )电压式、经典 1/4 波长( $\lambda/4$ )电压退压式、带相位调整器的 1/4 波长( $\lambda/4$ )电压加压式。与半波电压式相比, 后两种的 1/4 波长电压结构具有低电压特点, 在驱动电路设计和制造成本方面有优势。对于后两种结构, 加压式的结构相对复杂, 需要插入 1/4 波片, 同时也增加了成本和调试难度; 而退压式结构的晶体受高压加电时间较长, 脉冲出光依赖于电压卸载, 这既不利于延长晶体使用寿命, 也不容易提高开关速度, 甚至容易出现多脉冲的现象。

因此, 本文引入了一种基于晶体预偏置的电光调 Q 技术。首先设计了基于铌酸锂晶体预偏置的电光调 Q 谐振腔结构, 理论分析和仿真了晶体尺寸对其预偏置角

度的影响规律。进而, 依据该技术搭建激光谐振腔试验平台, 以氙灯泵浦 Nd:YAG 固体激光器为技术载体, 实现了窄脉宽、高功率的激光输出。

## 1 基于铌酸锂晶体预偏置的电光调 Q 激光器工作原理

如图 1 所示, 被泵浦的 Nd:YAG 自发辐射荧光的偏振态是随机的, 也就是说它的光子振动矢量在垂直于传播方向平面内是不定的, 起偏器可以使晶体中自发辐射的荧光转化成线偏振光(振动矢量在垂直于传播方向平面内是固定的), 其中, S 光(振动方向垂直于纸面)反射出偏振片而离开谐振腔, 而 P 光(振动方向平行于纸面)通过偏振片进入铌酸锂晶体。预偏置铌酸锂晶体的角度, 使其在自然双折射效应下起 1/4 波片的作用, 当晶体不加电时, 通过它的线偏振光变成圆偏振光, 从全反射镜反射回来第二次进入晶体, 此时圆偏振光又转变为线偏振光, 而偏振方向与入射调制晶体之前的偏振方向垂直, 线偏振光发生了 90° 旋转, 也就是现在的偏振方向与纸面垂直, 它再通过偏振片时被全反滤出, 于是光束不能进入激光晶体部分, 无法参与到激光振荡的过程,

\* 基金项目: 航空科学基金项目(2016ZC25001)。

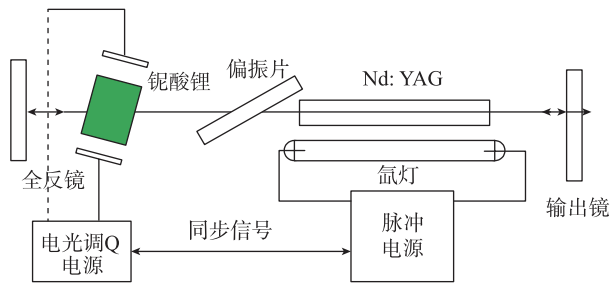


图1 基于铌酸锂晶体预偏置的电光调Q激光器结构  
Fig.1 Structure of electro-optic Q-switched oscillator based on pre-deflection of LN crystal

这样激光上能级粒子数得到有效的积累,这就相当于反射损耗增加到极大值,品质因数Q值处于低点,未能达到阈值。当晶体加横向电压时,感应双折射叠加到晶体自然双折射,调制晶体的光学性质发生改变,光束通过晶体后偏振方向和能量都保持不变,再经全反镜反射,可顺利地第二次通过调Q晶体与偏振片,在激光谐振腔中自由振荡。由于刚刚的调Q阶段使上能级粒子数得到大量积累,此时瞬时反转得到急剧的感应辐射,于是得到预期的脉宽很窄且能量很强的调Q脉冲。

这种谐振腔结构中的起偏器可以同时发挥检偏器的功能,光束第一次通过它时,它发挥起偏功能,得到线偏振光,不加晶压时,谐振腔处于低Q状态,光束第二次入射起偏器,它此时发挥检偏功能,使光束无法通过和参与激光振荡,这就是所谓的关门状态。

## 2 晶体预偏置角度计算与仿真

预偏置技术就是利用铌酸锂晶体的自然双折射效应<sup>[8-9]</sup>,使入射光束预先偏斜一个特定小角度,以使o光和e光的光程差等于1/4波长,这就等效于在光路中插入1个1/4波片。

当一束与光轴夹角很小的近轴光在晶体中传播时,利用折射率椭球可以计算出o光和e光的光程差为:

$$\varphi = \frac{1}{2} n_o^3 l_z [(n' \sin^2 \theta - 2\gamma_{22} E)^2 + 8\gamma_{22} E n' \sin^2 \theta \sin^2 \alpha]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$n' = \frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_o^2} \quad (2)$$

式中,  $l_z$  为晶体的光轴长度,  $n_e$  和  $n_o$  分别代表o光和e光的折射率,  $\gamma_{22}$  为LN晶体电光系数,  $\theta$  为入射光与晶体光轴夹角,  $\alpha$  为入射光主平面与晶体感应主轴  $x'$  和光轴  $z'$  组成平面的夹角。

在未加电场( $E=0$ )时,光程差为:

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} n_o^3 l_z n' \sin^2 \theta \quad (3)$$

由等效1/4波片可知,初始光程差  $\varphi_0 = \lambda/4$ 。

另外,在自然双折射作用下,只有使入射光偏振面与其主平面成  $\pi/4$  夹角,才能使偏振光往返通过该晶体后偏振面旋转  $90^\circ$ ,无法再次通过偏振片,从而使谐振腔Q开关处于理想关门状态。此时入射光分解出的o光和e光的强度相等。

欲确定初始光程差  $\varphi_0 = \lambda/4$  (或  $\varphi_0 = \lambda/4 + m\lambda$ ,  $m$  为整数),可对式(3)中各参量关系进行分析,可知初始光程差与晶体折射率、光轴长度、光线与光轴之间的夹角有关。

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} n_o^3 l_z \left( \frac{1}{n_e^2} - \frac{1}{n_o^2} \right) \sin^2 \theta = \frac{\lambda}{4} + m\lambda \quad (4)$$

对于LN晶体,在入射光波长为  $1.06\mu\text{m}$  情况下,其折射率为  $n_o = 2.233$ ,  $n_e = 2.154$ <sup>[10]</sup>,可得:

$$l_z \sin^2 \theta = 3.19 + 12.76m \quad (5)$$

由式(5)可得到晶体预偏置角度与晶体长度关系,见图2。

当给调Q晶体加电场时,因为入射光在感应主轴  $x'$  (或  $y'$ ) 和光轴  $z'$  组成平面内,此时  $\alpha = 0$ 。则有:

$$\varphi = \frac{1}{2} n_o^3 l_z (n' \sin^2 \theta - 2\gamma_{22} E) = \varphi_0 + \frac{\lambda}{2} \frac{V}{V_{\lambda/2}} \quad (6)$$

由于  $\varphi_0 = \lambda/4 + m\lambda$ ,  $m$  为整数,因此只要入射的近轴光在  $x'oz'$  (或  $y'oz'$ ) 平面内,并适当选择加到晶体上的电压  $V$ ,使  $V$  等于晶体半波电压的一半,即  $V = V_{\lambda/2}/2$ ,在自然双折射和感应双折射的共同作用下,就能使其偏振面恢复到P光状态而再次通过偏振片,从而实现谐振出光。

## 3 试验及讨论

### 3.1 装置和调试

为了验证晶体预偏置的调Q技术,本文搭建如图3所示的试验平台。谐振腔腔长296mm,腔内主要光学

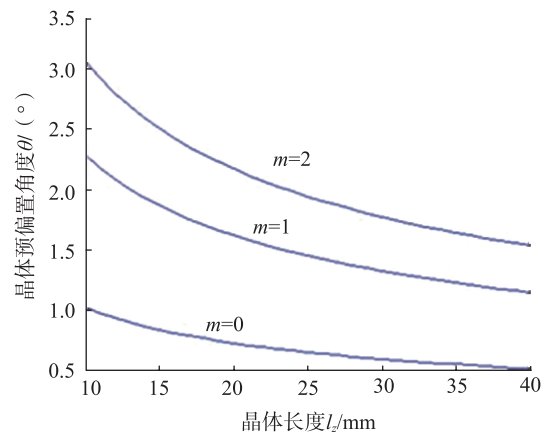


图2 晶体预偏置角度与晶体长度关系  
Fig.2 Relationship between angle and length of crystal

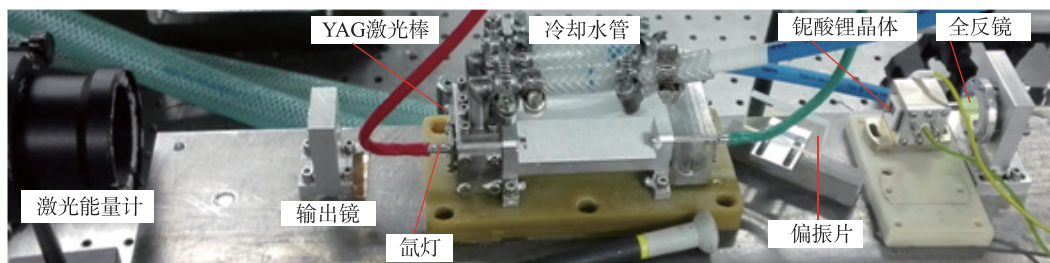


图3 晶体预偏置调Q激光技术试验平台

Fig.3 Experimental platform of laser technology with pre-deflection of the Q-switching crystal

器件及摆放位置依次为全反镜、铌酸锂晶体、偏振片、激光工作物质、输出镜。以掺钕 1% 的 YAG 作为激光工作物质,尺寸为  $\varnothing 5\text{mm} \times 92\text{mm}$ ; 氙灯泵浦,氙灯尺寸为  $\varnothing 5\text{mm}$ ,极间距  $75\text{mm}$ ,泵浦电压为  $700\text{V}$ ; 泵浦腔水冷冷却,输出镜透过率 10%。铌酸锂晶体分别垂直  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴切割,沿  $Z$  轴通光,其尺寸为  $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。另外,晶体垂直  $X$  轴的两侧面镀金作为正负电极,即电场方向沿  $X$  轴且垂直于通光的  $Z$  轴。根据式(5),取  $m=2$ ,可得晶体预偏置角度为  $\theta=2.18^\circ$ 。

先用指示光调整全反镜、输出镜和激光棒端面,使它们相互平行;再调整偏振片角度,使谐振腔内振荡光起偏;最后调整铌酸锂晶体与光轴夹角接近  $2.18^\circ$ ,使谐振腔无法起振。上述调整过程可参考输出镜输出能量的变化,以确定最佳位置。最后,调节调 Q 晶体所加载电压(取  $5800\text{V}$ )脉冲与氙灯电压脉冲的延时时间,以积累足够的上能级粒子数。

### 3.2 结果与讨论

当氙灯注入电压为  $700\text{V}$ ,谐振腔中未插入偏振片和铌酸锂调 Q 晶体时,输出静态能量为  $158\text{mJ}$ ;加入偏振片和铌酸锂调 Q 晶体,且晶体横向加载电压为 0 时,输出镜外侧未输出激光,这说明未加压得铌酸锂晶体处于 Q 开关的关断状态;当氙灯注入电压为  $700\text{V}$ ,铌酸锂调 Q 晶体横向加载电压  $5800\text{V}$  时,调节它们之间的延时为  $140\mu\text{s}$  时输出激光脉冲能量最大,这说明加电压的铌酸锂晶体处于 Q 开关的打开状态,用激光能量计(能量计为 NIM-E1000)测得脉冲能量为  $108\text{mJ}$ ;光电探头(THORLABS DET 10A)和示波器(Tektronix DPO 4054B)检测输出脉冲宽度,结果为  $15.76\text{ns}$ ,其波形如图 4 所示。

值得一提的是,调 Q 晶体预偏置角度的方向应与其入射光偏振面成  $\pi/4$  夹角,这样才能使入射光分解出的 o 光和 e 光的强度相等,往返通过该晶体后偏振面旋转  $90^\circ$ ,无法再次通过偏振片,从而在不加电压时 Q 开关就能处于理想关门状态。

另外,激光调 Q 脉冲在不同工作条件下,比如不同的脉冲重复率、泵浦强度、输出腔镜透过率等情况下,脉

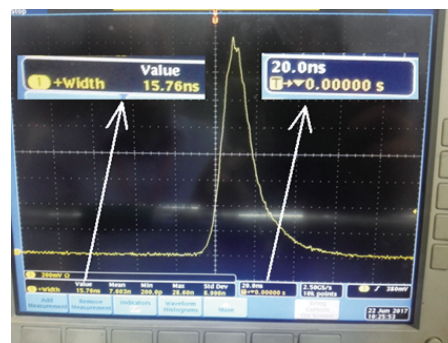


图4 调Q激光脉冲波形

Fig.4 Pulse waveform of the Q-switched laser

冲宽度、能量和效率将有所不同,其影响因素和规律将在后续工作中进一步研究。

## 4 结论

(1) 利用铌酸锂晶体的自然双折射特性,通过预偏置晶体的入射角度能实现调 Q 开关的关断功能。

(2) 基于铌酸锂晶体预偏置的电光调 Q 激光器可实现 Q 开关升压式输出脉冲激光。

## 参考文献

- [1] KILPELA A. Pulsed time-of-flight laser range finder techniques for fast, high precision measurement applications[D]. Oulun: University of Oulun, 2004: 26–29.
- [2] 苏凯. LD 侧面泵浦高能量电光调 Q Nd:YAG 激光器的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.  
SU Kai. Study on high-energy E-O Q-switched Nd:YAG laser with side-pumped by LD[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [3] LI P, WANG Q P, GAO D. Maximum peak power generation from Q-switched lasers[J]. Optics and Laser Technology, 1999, 31(3): 247–250.
- [4] CATELLA G C. Q-switching technologies: limitations and opportunities: finding the right Q-switch[C]//Proceedings Volume 7434, Optical Technologies for Arming, Safing, Fuzing, and Firing V. San Diego: SPIE Optical Engineering+Applications, 2009: 1–15.
- [5] 王富章, 陈彬, 孙军, 等. 低应力铌酸锂电光调 Q 开关的研

(下转第 101 页)

测量未涉及密集点云的问题,并保证了数据的高精度。

实践表明采用该方法所建立的测绘数模精度完全满足项目要求,该方法切实可行,可以作为一类航空产品再制造、再修理的重要测量手段。同时可为技术人员在飞机研制中获取设计思路等提供基础性数据。该方法能够广泛应用于有高精度需求领域的逆向建模中,可节省时间、人力及物力。

### 参考文献

[1] 周小东,成思源,杨雪荣,等.基于参数化逆向建模的仿真优化设计[J].组合机床与自动化加工技术,2015(11):14-18.

ZHOU Xiaodong, CHENG Siyuan, YANG Xuerong, et al. Simulation and optimization design based on parametric reverse modeling[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(11): 14-18.

[2] 张剑清,孙明伟,郑顺义,等.基于轮廓约束的摄影测量法元青花瓶数字三维重建[J].武汉大学学报(信息科学版),2009,34(1):7-10.

ZHANG Jianqing, SUN Mingwei, ZHENG Shunyi, et al. 3D reconstruction of a Yuan Dynasty blue-and-white porcelain based on profile constraint and photogrammetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(1): 7-10.

[3] 刘伟军,孙玉文.逆向工程原理、方法及应用[M].北京:机械工业出版社,2008.

LIU Weijun, SUN Yuwen. Reverse engineering principles, methods and applications[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2008.

[4] 郝建平.虚拟维修仿真理论与技术[M].北京:国防工业出版社,2008.

HAO Jianping. Virtual maintenance simulation theory and technology[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2008.

[5] SEOKBAE S, HYUNPUNG P, KWAN H L. Automated laser scanning system for reverse engineering and inspection[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2002, 42(8): 889-897.

[6] 王永信,邱志慧.逆向工程及检测技术与应用[M].西安:西安交通大学出版社,2014.

WANG Yongxin, QIU Zhihui. Reverse engineering and detection technology and application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2014.

[7] 秦龙,涂群章,赵建勋,等.基于FARO测量系统的工程装备零部件逆向建模和虚拟维修研究[J].矿山机械,2011,39(12):98-101.

QIN Long, TU Qunzhang, ZHAO Jianxun, et al. Study on reverse modeling and virtual maintenance of engineering equipment based on FARO measurement system[J]. Mining & Processing Equipment, 2011, 39(12): 98-101.

[8] 黄桂平.数字近景工业摄影测量理论、方法与应用[M].北京:科学出版社,2016.

HUANG Guiping. The theory, method and application of digital close-up industrial photogrammetry[M]. Beijing: Science Press, 2016.

[9] 张序,李兆堃,张婉莹,等.手持式激光扫描仪在文物测量中的应用研究[J].测绘通报,2013(12):41-44.

ZHANG Xu, LI Zhaokun, ZHANG Wanying, et al. Application

research on portable laser scanner in heritage measurement[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(12): 41-44.

[10] 金雯.基于三维激光扫描技术的交通事故现场快速处理[D].上海:同济大学,2007.

JIN Wen. Traffic accident quick processing based on 3D laser scanning technology[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.

[11] 汪建波,孙亦东.手持式三维激光扫描仪在文物保护中的应用[J].江西测绘,2017(1):47-50.

WANG Jianbo, SUN Yidong. The application of hand-held 3D laser scanner in the protection of cultural relics[J]. Jiangxi Cehui, 2017(1): 47-50.

[12] 彭艳敏,党建卫.基于模线样板飞机蒙皮类零件的逆向设计[J].CAD/CAM与制造业信息化,2013(8):46-49.

PENG Yanmin, DANG Jianwei. Reverse design of aircraft skin parts based on mold model[J]. Digital Manufacturing Industry, 2013(8): 46-49.

通讯作者:黄桂平,副教授,研究方向为工业近景摄影测量, E-mail: gui-ping.huang@chenway.cn.

(责编 逸飞)

(上接第95页)

究[J].人工晶体学报,2013,42(7):1315-1318.

WANG Fuzhang, CHEN Bin, SUN Jun, et al. Research on lower stress lithium niobate electro-optical Q-switches[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(7): 1315-1318.

[6] KOECHNER W. 固体激光工程[M].北京:科学出版社,2002:421-437.

KOECHNER W. Solid-state laser engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002: 421-437.

[7] MELNIKOV K. Electro-optic Q-switch driver design specifics[C]/Proceedings Volume 7822, Laser Optics 2010. San Diego: SPIE Optical Engineering+Applications, 2011: 1-7.

[8] 万玲玉,苏世达,刘立人,等.基于晶体双折射和电光效应设计的90°2×4空间光桥接器[J].中国激光,2009,36(9):2358-2361.

WAN Lingyu, SU Shida, LIU Liren, et al. Design of a new 90° 2×4 hybrid based on the birefringence and the electro-optic effect of crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(9): 2358-2361.

[9] 张铁强,申兹国,郭山河.电光晶体光学性质的折射率椭球分析法[J].量子电子学,1992,9(3):242-245.

ZHANG Tieqiang, SHEN Ziguo, GUO Shanhe. Analysis on optical characteristics of electro-optic crystals from refractive indices ellipsoid[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1992, 9(3): 242-245.

[10] HOB DEN M V, WARNER J. The temperature dependence of the refractive indices of pure lithium niobate[J]. Physics Letters, 1966, 22(3): 243-245.

通讯作者:顾海栋,博士、工程师,研究方向为激光系统设计, E-mail: hagongda2008@126.com.

(责编 逸飞)