

2.7 μm 声光 Q 开关

胡 南¹, 张 涛², 罗炜明², 杨 涛², 杨宇翔², 令狐梅傲², 陈 倩²

(1. 重庆理工大学 光电信息学院, 重庆 400050; 2. 中国电子科技集团公司第 26 研究所, 重庆 400060)

摘 要:介绍了 2.7 μm 声光 Q 开关的设计、制作及应用。该器件采用氧化碲晶体作为声光互作用介质, 铌酸锂晶体作为压电换能器材料, 工作频率为 27.12 MHz。实验结果表明, 在 20 W 电功率的驱动下, 对于 2.7 μm 的光波长, 衍射效率达 55%, 光透过率高于 99%。该文还考虑了吸声和散热的问题, 设计和制作了一套水冷散热机制, 实验证明效果良好。

关键词:声光 Q 开关; 衍射效率; 氧化碲

中图分类号:O426.3 **文献标识码:**A

Study on the 2.7 μm Acousto-optic Q Switch

HU Nan¹, ZHANG Tao², LOU Weiming², YANG Tao², YANG Yuxiang², LINGHU Meiao², CHEN Qian²

(1. School of Opto-Electronic Information, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China;

2. 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The design, fabrication and applications of the 2.7 μm acousto-optic Q switch have been introduced in this paper. TeO_2 crystal has been used as the acousto-optic interaction material and LiNbO_3 has been used as the piezoelectric transducer material, the operation frequency of Q switch is 27.12 MHz. The experiment results show that the diffraction efficiency of the Q switch is up to 55% and the light transmittance is greater than 99% with respect to the laser wavelength of 2.7 μm at the driving power of 20 W. The sound absorption and heat radiation have been considered in the Q switch design. A water cooling mechanism has been designed and fabricated. The experiment verifies that the mechanism has good performance.

Key words: acousto optic Q switch; diffraction efficiency; TeO_2

0 引言

声光 Q 开关因其具有体积小, 响应快, 工作电压低, 重复频率高及控制方便等优点而得到广泛应用, 特别是在红外波段的激光系统中, 发挥着重要的作用。

中红外 2.7 μm 波段激光在军事对抗、光谱分析、环境监测和医疗设备等方面有广泛的应用, 是近年来基于光参量振荡 (OPO) 技术而获得的重要激光源。由于这种可调谐的中红外固体激光器具有波长调谐范围宽, 转换效率高, 结构紧凑, 质量轻和维护简单等特点, 已成为各方研究的热点。

国外, 适用于该激光波段的声光器件已研制成功, 并应用于实际的工程系统中。国内至今还未见报道。根据实际需要, 我们设计制作了 2.7 μm 声光 Q 开关。它具有体积小, 衍射效率高, 插入损耗

低, 调制速度快和工作稳定可靠等特点, 其性能指标和国外的同类器件相当。

1 基本原理

声光 Q 开关由声光器件和驱动电源组成, 其基本原理如图 1 所示。驱动电源输出的高频电信号通过电极加载到压电换能器上, 再由换能器转化为超声波, 并通过焊接层耦合进入声光互作用介质, 在介质内形成了类似于折射率的“相位光栅”, 当入射激光通过声光介质时就会产生衍射光。由于声光衍射使部分入射光偏离了原来的传播路线, 未被衍射的入射光线受到削弱, 给激光腔内的光振荡带来了损耗。当衍射效率足够高或腔内损耗足够大时, 激光腔内的 Q 值会变得很低, 光振荡被抑制住而不能产生激光输出, 泵浦光源产生的能量便累积在激光介质内。待光能量积累到一定程度后, 让控制信号停

收稿日期: 2012-02-21

作者简介: 胡南(1976-), 女, 重庆人, 硕士生, 主要从事光学信息处理和数字全息技术等方面研究。E-mail: chenhu2002@cqut.edu.cn。

止驱动电源向声光器件输出驱动电信号,声光介质内没有了折射率光栅,衍射光也随即消失,腔内损耗变得很低,Q值会突然猛增,激光介质中积累的能量瞬间被释放,这就形成了大功率、窄脉宽的巨脉冲激光输出。如果让控制信号工作于高重复频率的脉冲工作状态时,激光器就会输出高重复频率、大功率的脉冲激光。

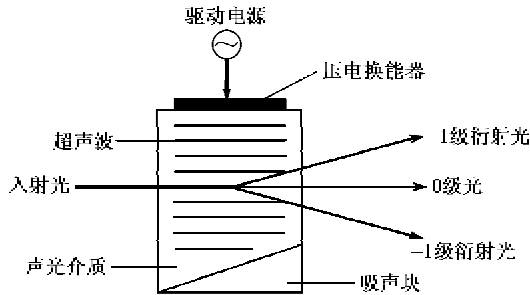


图1 声光Q开关基本原理

2 设计

2.1 结构外形

声光Q开关由一只声光Q开关器件,一台驱动电源和一条高频电缆线连接两部分所组成,如图2所示。

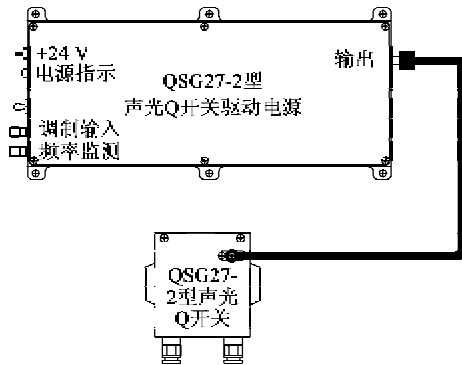


图2 声光Q开关外形图

声光Q开关器件的结构如图3所示,换能器粘结在声光互作用介质的一端,另一端被加工成斜角锥形并涂上吸声材料以消除超声波反射回波的影响。我们使用的声光互作用工作介质是光学氧化碲(TeO_2)晶体,换能器采用 36° -Y切铌酸锂(LiNbO_3)晶片,通过冷压焊工艺,即利用真空加压的方法把

LiNbO_3 与声光介质的通声面键合在一起。键合层材料采用高纯锡,电极层材料选择高纯金,键合完成后将换能器减薄到一定的厚度并镀制表电极。

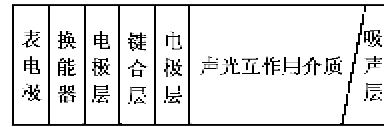


图3 器件结构

声光Q开关驱动电源由振荡电路、电压放大电路、功率放大电路、内调制方波发生电路和调制电路所组成,线路结构如图4所示。

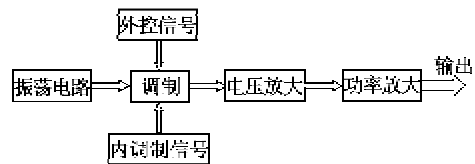


图4 驱动电源方框图

驱动电源采取箱式结构内部设有屏蔽盒,各控制功能部件均安装在内面板上,后部设置有散热片,为整体散热板形式,加工全面积深度齿形槽以充分散热。

由于声光器件的工作状态是大功率驱动,发热效应明显,主要的热源是换能器加热和体吸收加热,如果散热不好就会出现热量的不断积累,从而引发整个声光介质和压电换能器的高温,最终导致换能器的烧毁和声光介质的破裂。因此,必须对压电换能器和声光介质进行有效地散热。为此,我们设计了一种减振、减压且散热良好的组装结构,并通水进行冷却。实验表明,效果很好。

2.2 衍射效率

作为一种控制激光腔内能量循环的调制元件,声光Q开关的衍射效率又被称为衍射损耗,是描述其关断激光功率能力的主要指标。为了获得优秀的光功率处理能力,声光介质应选用具有光学质量高,光透过性好,光吸收小,无形变,化学性质稳定及声光优值较高等特点的材料。经综合考虑,我们最终采用以光学 TeO_2 晶体作为 $2.7\ \mu\text{m}$ 声光Q开关的声光互作用工作介质,其主要特性如表1所示。

表1 声光介质材料特性

材料	透光区/ μm	密度/(g/cm^3)	超声波模式	声速/(m/s)	光偏振态	$M_2/(10^{-15}\ \text{s}^2/\text{kg})$
TeO_2	0.35~5.00	5.99	纵波[001]	4 200	⊥	34.5
					//	25.6
			横波[110]	616	圆偏振光	1 200

由于 36°-Y 切的 LiNbO_3 晶体具有较高的机电耦合系数, 可获得较高的转换效率和较大的工作带宽, 而其相对介电系数不大, 适用于较高的工作频率。因此, 我们选用 36°-Y 切的 LiNbO_3 晶体作为压电换能器材料, 使它以厚度驱动模式工作以激发超声纵波。其机电耦合系数为 0.49, 声速为 7 300 m/s, 相对介电系数为 38.6, 频率常数为 3 650 $\text{MHz} \cdot \mu\text{m}$ 。

声光 Q 开关要求以尽可能小的驱动电功率获得尽可能高的衍射效率, 这就要求声光相互作用长度 (L) 越长越好, 但 L 越长, 腔内插入损耗也越高, 因此, 需选取适当的 L 。 L 与表征声光相互作用失配程度的克莱因-库克 Q 参数值成正比, 即

$$Q = \frac{2\pi\lambda_0 L}{n\Delta^2 \cos \theta_i} \approx \frac{2\pi\lambda_0 L}{n\Delta^2} = \frac{2\pi\lambda_0 L f_0^2}{nV^2} \quad (1)$$

式中: $f = 27.12 \text{ MHz}$, 为载波频率; λ_0 为光波长; n 为 TeO_2 晶体的折射率; V 为超声波的速度。

根据选用的声光介质特性、工作频率、光波长及由声光 Q 开关器件尺寸确定的 L 就可确定 Q 参数值, 我们采用的 Q 参数值为 9.2, 此时 $1 < Q \leq 4\pi$, 器件的工作模式是介于喇曼-奈斯型和布喇格型之间的过渡型工作模式。

对于声光 Q 开关, 由于使用 0 级光, 其衍射效率为所有衍射光的效率之和。对于这种工作模式的声光 Q 开关, 可根据声光衍射效率的公式进行估算:

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\xi}{2}\right) = \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{M_2 L P_a}{2H}}\right) \quad (2)$$

式中: η 为衍射效率; ξ 为入射光通过器件时发生声光相互作用的相移; P_a 为超声功率; M_2 为声光优值; H 为光孔径。

由于入射光可分解成 \perp 偏振光和 \parallel 偏振光, \perp 偏振光为垂直于入射光与超声波矢量组成的平面, \parallel 偏振光为平行于入射光与超声波矢量组成的平面。 \perp 偏振光的 M_2 较高, 为 $34.5 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$, \parallel 偏振光的 M_2 较低, 为 $25.6 \times 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$, 根据式 (2) 并以较低的 M_2 计算得到 $P_a = 6.2 \text{ W}$, 考虑到机电转换损耗和其他损耗, 驱动电功率需大于 18 W, 我们在实际制作中采用 20 W 的 P_a , 达到 55% 的衍射效率。

另外, 声光 Q 开关驱动电源产生的射频信号通过压电换能器转换为超声波传输到声光介质时, 激

光只与介质内的基频超声波发生声光互作用, 无法同时与谐波发生互作用, 射频信号中的谐波成分对声光衍射并不起作用, 反而造成了能量的浪费。因此, 要提高声光 Q 开关的衍射效率, 还需抑制驱动电源输出信号中的谐波分量。

2.3 光透过率

激光器的输出功率受腔内损耗变化的影响很大, 为了获得高品质的出射激光, 需尽量减少腔内元件的插入损耗, 一般均需对通光元件的表面镀制增透膜以增加光透过率。声光 Q 开关腔内插入损耗的高低主要由材料的吸收损耗、通光面的光洁度、高透射率薄膜剩余反射率等因素决定。另外, 水分子或氢氧根离子 (OH^-) 对 2.7 μm 附近的红外光存在强烈的吸收效应, 会导致透射率的显著下降, 因此, 镀膜时要做到尽量不含有水分子或 OH^- , 以提高增透的效果。

根据经典的薄膜光学理论, 对于单层光学增透薄膜的光学参数要求为:

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_s} \quad (3)$$

$$n_1 d = \lambda/4 \quad (4)$$

式中: n_1 为薄膜的折射率; n 为 TeO_2 晶体声光介质的折射率; n_0 为空气的折射率; d 为薄膜的厚度; λ 为入射光波长。其中, n_1 的理论估算值约为 1.48, 实际上也不一定有正好符合该折射率的膜料, 但在常用的膜料中, 氟化镱 (YbF_3) 的折射率接近于该值, 且该材料具有从近紫外到中红外的良好透光性, 及好的化学稳定性, 是目前备受关注的优异镀膜材料, 选用此材料镀膜后可得到的理论光学透过率 $T \approx 99.8\%$ 。因此, 我们采用 YbF_3 材料为声光 Q 开关镀制了增透膜, 实验结果表明, 光透过率大于 99%。

根据声光互作用理论, 布喇格入射条件为

$$\sin \theta_B = \lambda / (2n_s \Lambda) \quad (5)$$

$$\Lambda = V / f \quad (6)$$

式中: θ_B 为布喇格角度; Λ 为超声波长, f 为超声波频率。

器件工作时需调节这个布喇格角度, 因此, 带来了使用上的不便, 也使膜层的反射光偏离了原来的激光振荡方向, 从而增加了腔内的插入损耗。为了解决这个问题, 我们在声光 Q 开关器件的通声面设计出了一个布喇格角, 如图 5 所示。在声光互作用介质上修出布喇格角, 使用时使激光垂直入射到通

光面即可,这样就减少了反射杂散光,显著降低了声光器件的腔内插入损耗,同时也方便了使用。

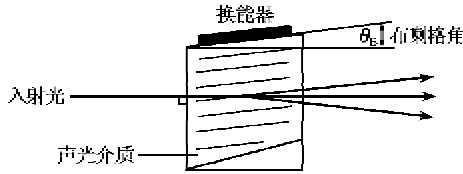


图5 块体修正

透光元件的光损伤阈值受其表面光洁度和膜层强度的影响很大,其原因是表面抛光后总会留有刮痕、瑕疵、不完善等缺陷,在这些地方的光波电场显著加强,因此,表面以下的有效电场值大大高于平均电场值。表面的光学击穿或故障易在这些缺陷的周围发生。解决的途径为:

- 1) 尽可能提高抛光的质量,以提高其表面的光洁度。
- 2) 努力提高镀膜的技术水平,以达到高透射率、高强度和高损伤阈值的增透膜。但在实际加工中,如果过分强调了高光洁度,就会引起平面度、平行度等指标的降低,对插入损耗的影响也很大,因此,需兼顾和协调好各方面的制约因素,制作时严格控制好工艺参数,才能取得令人满意的效果。

3 实验结果

对于声光 Q 开关,提高衍射效率和光透过率很重要,这直接关系到关断激光功率的提高和插入损耗的降低,对脉冲激光的性能有重要的影响。图 6 为声光 Q 开关的衍射效率测试装置,开启驱动电源,调节好器件在光路中的位置,使 0 级光功率达到最小,此时的光功率记录为 I_1 ,然后关闭驱动电源,再测出 0 级光功率记录为 I_0 ,则 $\eta = 1 - I_1/I_0 \times 100\%$ 。

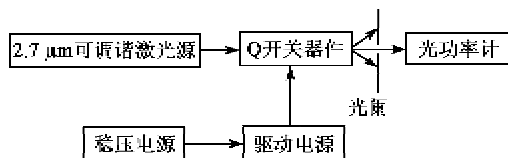


图6 衍射效率测试

图 7 为声光 Q 开关的光透过率测试装置,将声光 Q 开关器件放入光路中,测出此时的最大光强为 I_1 ,然后将器件移开,此时测出的最大光强为 I_0 ,则 $T = I_1/I_0 \times 100\%$ 。



图7 光透过率测试

表 2 为 2.7 μm 声光 Q 开关的主要性能指标。

表 2 声光 Q 开关主要性能

型号	光波长/ μm	载波频率/MHz	通光孔径/mm
QSG27-2	2.7	27.12	3
衍射效率/%	电功率/W	调制频率/kHz	电压驻波比
55	20	0.01~50.00	≤ 1.2
电脉冲下降时间/ns	电脉冲上升时间/ns	光透过率/%	
90	93	≥ 99	

图 8 为 2.7 μm 声光 Q 开关的实物照片。

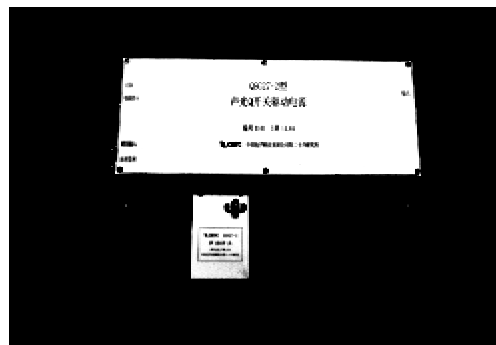


图8 实物照片

4 结束语

我们采用 TeO_2 晶体制作的 2.7 μm 声光 Q 开关,具有衍射效率高,插入损耗低,调制速度快,使用方便,稳定可靠等特点。实现了中波红外激光的声光调 Q,为获得高重频,大峰值功率的脉冲激光和研制高性能的 2.7 μm 激光器奠定了坚实的基础。

参考文献:

[1] 徐介平. 声光器件的原理、设计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1982.

[2] MAAK P, JAKAB I, RICHTER P, et al. Efficient acousto-optic Q switching of Er^{3+} :YSGG lasers at 2.79 μm wavelength[J]. Applied Optics, 2000, 39(18): 3053-3059.